

# **Beitrag zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Zahnriemenförderern**

Von der Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Chemnitz

Genehmigte

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt  
von Dipl.-Ing. Hendrik Kaden  
geboren am 24. August 1968 in Karl- Marx- Stadt  
eingereicht am: 16.04.2008

Gutachter:  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel  
Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde  
Dr.-Ing. Michael Bosse

Chemnitz, den 01.09.2008

<http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2008/0120>



# Bibliographische Angaben

Autor: Hendrik Kaden

„Beitrag zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Zahnriemenförderern“

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik, Chemnitz 2008

146 Seiten, 153 Abbildungen, 5 Tabellen, 60 Literaturstellen

## Referat

Zahnriemenfördersysteme haben auf Grund ihrer wirtschaftlichen und technischen Vorteile beim Transport von Stückgütern ein breites Anwendungsfeld in den unterschiedlichen Bereichen der Industrie gefunden und gewinnen weiterhin an Bedeutung. Die Auslegung der Systeme beschränkt sich gegenwärtig im Wesentlichen auf die Zugstrang- und die Zahnfußfestigkeit des Zahnriemens. Grundlagen der Berechnungen sind oft recht vage Aussagen zur Höhe des Reibwertes zwischen dem Zahnriemen und dessen Stützschiene. Die Erhöhung der Kontakttemperatur durch die eingebrachte Reibleistung wird meist völlig vernachlässigt. In der Praxis wird oftmals auf Erfahrungswerte zurückgegriffen, wobei die Gefahr der Über- bzw. Unterdimensionierung mit erheblichen Auswirkungen auf die Lebensdauer, das Verschleißverhalten und die Betriebssicherheit besteht.

Ziel der Arbeit war es, Potentiale zu Steigerung der Belastungsgrenzen und der sicheren Dimensionierung sowie zur Reduzierung von Verschleiß an Zahnriemenförderern an bestimmten Führungsschienen zu erschließen. In die Bewertung wurden die Reibwertentwicklung aus Kurzzeit- (bis 8 Stunden) und Langzeituntersuchungen (über 7 Tage) und die Kontakttemperatur einbezogen. Anhand der Ergebnisse dieser Arbeit sollen günstige Zahnriemen- Stützschiene paarungen für entsprechende Anwendungen gewählt werden können. Die Reibwerte zwischen Stützschiene und Zahnriemen sollen abschätzbar, und die Kontakttemperatur der Wirkpaarung im Zahnriemenförderer unter Einbeziehung von Beanspruchung und konstruktiven Aufbau von beschreibbar sein. Mit der Festlegung einer zulässigen Kontakttemperatur und deren Berechnung wurde zusätzliches Auslegungskriterium für diese Fördereinrichtungen geschaffen.

## Schlagworte

- Transport- Zahnriemen,
- Reibwertverhalten,
- Lebensdauer,
- Dimensionierung,
- Verschleiß,
- Kontakttemperatur.



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Professur Fördertechnik im Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Nendel für die Anregung der Themenwahl, sowie die Betreuung und Förderung während der Arbeit. Für seine Betreuung als Doktorvater in diesem interessanten und vielseitigen Aufgabenfeld möchte ich ihm meinen herzlichen Dank aussprechen.

Bei Herrn Dr.-Ing. Michael Bosse und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde möchte ich mich für die Übernahme der Koreferate und ihre hilfreichen Anregungen bedanken. Herrn Dr.-Ing. Jens Sumpf danke ich für die hilfreichen Diskussionen und seine Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der FEM-Simulationen.

Des Weiteren danke ich den Mitarbeitern des Institutes für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik und anderer Fachgebiete der TU Chemnitz, die mir bei zahlreichen wissenschaftlichen Problemen hilfreich zur Seite standen. Des Weiteren schulde ich den Personen innerhalb und außerhalb der Professur, die mir bei der Korrektur und Überarbeitung der Arbeit behilflich waren, Dank für ihre Mithilfe und interessanten Anregungen.

Hendrik Kaden



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau und Einsatz von Zahnriemenförderern, Ziel der Arbeit und Abgrenzung .....</b>	<b>15</b>
2.1	Zahnriemen.....	15
2.2	Aufbau von Zahnriemenförderern und Einsatzformen.....	20
2.3	Belastung und Auslegung von Zahnriemenförderern.....	24
2.3.1	Beanspruchung am Zahnriemenförderer.....	24
2.3.2	Dimensionierung von Zahnriemenförderer.....	27
2.4	Ziel der Arbeit.....	30
<b>3</b>	<b>Grundlagen.....</b>	<b>33</b>
3.1	Reibung .....	33
3.1.1	Allgemeine Tribologie.....	33
3.1.2	Tribologie der Polymere.....	36
3.2	Verschleiß.....	41
3.3	Thermisches Verhalten.....	43
3.3.1	Allgemeines.....	43
3.3.2	Instationäre Wärmeleitung.....	44
3.3.3	Stationäre Wärmeleitung.....	47
<b>4</b>	<b>Analyse der Beanspruchung.....</b>	<b>51</b>
4.1	Tribologie der Wirkpaarung.....	51
4.2	Verschleiß am System Zahnriemen-Gleitabstützung .....	52
4.3	Thermische Beanspruchung der Wirkpaarung - Wärmebilanz.....	53
4.4	FEM-Analyse .....	58
4.5	Theoretische Überlegungen zur Belastung des Systems Zahnriemen - Stützschiene ...	62
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen.....</b>	<b>65</b>
5.1	Übersicht und Versuchsstrategie .....	65
5.2	Versuchsaufbau .....	67
5.3	Versuchsbedingungen .....	69
5.3.1	Versuchsparameter.....	69
5.3.2	Versuchsdurchführung.....	73
5.3.3	Messwertaufbereitung.....	74
5.4	Ergebnisse der Untersuchungen.....	75
5.4.1	Allgemeiner Verlauf von Reibwerten.....	75

5.4.2	Reibwertverhalten bei kurzzeitiger Beanspruchung.....	78
5.4.2.1	Versuchsparameter.....	78
5.4.2.2	Stützschiennenmaterial Schichtholz.....	79
5.4.2.3	Stützschiennenmaterial Stahl .....	83
5.4.2.4	Stützschiennenmaterial Polyethylen UHMW.....	86
5.4.2.5	Stützschiennenmaterial PTFE .....	90
5.4.2.6	Stützschiennenmaterial PA 6 G.....	91
5.4.3	Langzeituntersuchungen.....	92
5.4.3.1	PAZ-Zahnriemen - Schichtholzgleitschienen.....	93
5.4.3.2	PAZ-Zahnriemen - Stahlgleitschienen.....	96
5.4.3.3	PAZ-Zahnriemen – PE-UHMW-Gleitschienen.....	99
5.4.3.4	PAZ-Zahnriemen - Aluminiumgleitschienen.....	102
5.4.3.5	PAZ-Zahnriemen - PA 6 Guss Öl-Gleitschienen.....	104
5.4.4	Kontakttemperatur.....	106
5.4.4.1	Thermische Untersuchungen.....	109
5.4.4.2	Thermische Zerstörung der PE-UHMW Gleitschienen.....	115
5.5	Bewertung der Versuchsergebnisse.....	117
5.5.1	Zusammenfassung Kurzzeitversuche.....	117
5.5.2	Zusammenfassung Dauerversuche.....	119
5.5.3	Thermisches Verhalten .....	121
<b>6</b>	<b>Berechnungsansätze.....</b>	<b>123</b>
6.1	Reibwertentwicklung an PE- Gleitschienen.....	123
6.2	Berechnung der Kontakttemperatur.....	125
6.2.1	Berechnungsmodell der Grenzbelastung bei ausgewählten Paarungen .....	129
6.2.2	Berechnungsbeispiel.....	132
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>135</b>
7.1	Zusammenfassung.....	135
7.2	Ausblick.....	136
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>139</b>
	<b>Anlage .....</b>	<b>143</b>



# Abkürzungen und Formelzeichen

## Abkürzungen

Kurzzeichen	Erklärung
PA	Polyamid
PAZ	Zahnseitige Beschichtung mit Polyamidgewebe
PE-UHMW	Ultrahochmolekulares Polyethylen, ultra high molecular weight
PTFE	Polytetrafluorethylen
PU	Polyurethan
PUR	Polyurethan, Bezeichnung nach DIN
RT	Raumtemperatur
Rz	Gemittelte Rautiefe
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
ZR	Zahnriemen

## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erklärung
$A$	$\text{mm}^2$	Oberfläche
$a$	$\text{m/s}^2$	Beschleunigung
$A_f$	$\text{mm}^2$	Freie Fläche
$A_k$	$\text{mm}^2$	Kontaktfläche
$A_N$	$\text{mm}^2$	Nominalfläche
$A_o$	$\text{mm}^2$	Geometrische Fläche, projizierte Fläche
$A_r$	$\text{mm}^2$	Reale Kontaktfläche
$b$	$\text{mm}$	Breite
$c$	$\text{J/K}$	Wärmekapazität
$c_s$	$\text{W}/(\text{K}^4\text{m}^2)$	Strahlungszahl
$E$	$\text{N/mm}^2$	Elastizitätsmodul
$F$	$\text{N}$	Kraft
$F_a$	$\text{N}$	Beschleunigungskraft
$F_{Ad}$	$\text{N}$	Adhäsionskraft

Zeichen	Einheit	Erklärung
$F_{An}$	N	Antriebskraft
$F_{Def}$	N	Deformationskraft
$F_{Hub}$	N	Hubkraft
$F_N$	N	Normalkraft
$F_R$	N	Reibkraft
$F_{St}$	N	Staukraft
$F_U$	N	Umfangskraft
$F_{USpez}$	N/mm	Spezifische Belastbarkeit der Riemenzähne
$F_V$	N	Vorspannkraft
$F_{ZSt}$	N	Zulässige Zugstrangkraft
$g$	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
$h$	mm	Höhe
$i$	-	Anzahl
$k$	W/m <sup>2</sup> K	Wärmedurchgangskoeffizient
$m$	kg	Masse
$p$	N/mm <sup>2</sup>	Pressung
$P_R$	W	Reibleistung
$P_v$	W	Verlustleistung
$Q$	Ws	Wärmemenge
$Q_{gesp}$	Ws	Gespeicherte Wärme
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$\dot{Q}_{abgef}$	W	Abgeführter Wärmestrom
$\dot{Q}_{gesp}$	W	Gespeicherter Wärmestrom
$\dot{Q}_K$	W	Wärmestrom, Konvektionsanteil
$\dot{Q}_L$	W	Wärmestrom, Leitungsanteil
$\dot{Q}_{St}$	W	Wärmestrom, Strahlungsanteil
$\dot{Q}_{zug}$	W	Zugeführter Wärmestrom
$r$	mm	Abstand
$s$	mm	Schichtstärke
$t$	s, min, h, d	Zeit
$T$	K, °C	Temperatur
$T_K$	K, °C	Kontakttemperatur

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Erklärung</b>
$T_u$	K, °C	Umgebungstemperatur
$T_{zul}$	K, °C	Zulässige Temperatur
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$W_{ab}$	mN/m	Adhäsionsarbeit
$z_e$	-	Eingreifende Zähnezahl
$\alpha$	W/m²K	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha$	°	Steigungswinkel
$\Delta T$	K	Temperaturdifferenz
$\Delta T_{zul}$	K	Zulässige Temperaturdifferenz
$\gamma_a, \gamma_b$	mN/m	Oberflächenenergien der einzelnen Gleitpartner
$\gamma_{ab}$	mN/m	Grenzflächenenergie der Gleitpartner
$\gamma^d$	mN/m	Oberflächenenergie, disperser Anteil
$\gamma^p$	mN/m	Oberflächenenergie, polarer Anteil
$\epsilon_{12}$	-	Emissionsgrad
$\mu$	[1]	Reibwert
$\mu_{ad}$	[1]	Reibwert, adhäsiver Anteil
$\mu_{def}$	[1]	Reibwert, deformativer Anteil
$\mu_F$	[1]	Reibwert zwischen Zugmittel und Abstützung
$\mu_G$	[1]	Reibwert zwischen Zugmittel und Fördergut



# 1 Einleitung

Die Notwendigkeit der Steigerung der Produktivität von Fertigungs- und Produktionsanlagen, die Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Logistik- und Materialflusssystemen und die Sicherheit von Anlagen und Aggregaten erfordert auch die Erhöhung der Leistungsfähigkeit von einzelnen Konstruktionselementen. In diesem Zusammenhang hat der Einsatz von Zahnriemen, auch Synchronriemen genannt, in den letzten Jahren beständig an Bedeutung als Antriebs-, Förder- und Steuerelement zugenommen.

Das relativ junge Maschinenelement Synchronriemen ist in den letzten Jahren immer weiter entwickelt worden, wobei die Vorzüge kraft- und formschlüssiger Wirkelemente übernommen werden konnten. Dabei reicht das Anwendungsspektrum der Synchronriemen von Kleinstantrieben in feinmechanischen Erzeugnissen bis hin zu Hauptantrieben in Werkzeugmaschinen, als Steuertrieb in Otto- und Dieselmotoren oder als Übertragungselement in fördertechnischen Einrichtungen. Der Vielfalt der Anforderungen in den einzelnen Anwendungen folgte eine Vielzahl verschiedener geometrischer Formen, Materialien und Eigenschaften für Zahnriemen.

In dieser Arbeit werden spezielle Zahnriemenfördersysteme untersucht, mit deren Hilfe Stückgut stetig transportiert wird. Die Leistungsfähigkeit dieser Fördersysteme hat entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems des innerbetrieblichen Materialflusses und damit der Effizienz der betrieblichen Logistikkette.

Der Einsatz von Zahnriemenfördern reicht von der Zuführung von Teilen bzw. Werkstückträgern in der Montageindustrie bis zum Gepäcktransport mit Geschwindigkeit bis 12 m/s in Flughäfen. Der Transport erfolgt auf der Zahnriemenrückseite mittels Form- oder Kraftschluss. Dabei wird die Zahnseite auf Gleitelementen bzw. bei hohen Geschwindigkeiten auf Rollelementen gestützt und die Gutmasse ins Gestell abgeführt. Die Ausführungen können ein- oder mehrsträngig ausgeführt sein und somit den Abmessungen des Transportgutes angepasst werden.

Die Vorteile gegenüber anderen Zugmitteln wie Ketten, Flach- und Keilriemen führen bzw. führten überall dort zu einer Verdrängung der klassischen Übertragungselemente, wo spezifische Eigenschaften der Synchronriemen gefordert werden. Entscheidend für eine Vielzahl von Anwendungen ist der Vorteil, Bewegungen schlupffrei übertragen zu können, ohne dabei die Hauptnachteile der Kettenförderer, wie Geräuschentwicklung, Notwendigkeit der Schmierung und Verschleißerscheinungen aufzuweisen. [HAH87, RUß92]

Ziel der Arbeit war es, Potentiale zu Steigerung der Belastungsgrenzen und der sicheren Dimensionierung sowie zur Reduzierung von Verschleiß an Zahnriemenförderern an bestimmten Führungsschienen zu erschließen. In die Bewertung wurden die Reibwertentwicklung und die Kontakttemperatur einbezogen. Anhand der Ergebnisse dieser Arbeit sollen günstige Zahnriemen-Stützschiennenpaarungen für entsprechende Anwendungen gewählt werden können. Die Reibwerte zwischen Stützschiene und Zahnriemen sollen abschätzbar, und die Kontakttemperatur der Wirkpaarung im Zahnriemenförderer beschreibbar sein. Mit der Festlegung einer zulässigen Kontakttemperatur und deren Berechnung wurde ein zusätzliches Auslegungskriterium für diese Fördereinrichtungen geschaffen.

## 2 Aufbau und Einsatz von Zahnriemenförderern, Ziel der Arbeit und Abgrenzung

### 2.1 Zahnriemen

Der Zahnriemen, als einziges formschlüssiges Riemengetriebeelement, ist eine Verbundkonstruktion, bei der die Zugstränge in eine formstabile Elastomer-Matrix eingebettet sind, aus der gleichzeitig die unterschiedlichen Zahngeometrien geformt werden. Bei Aufnahme der Zugkräfte müssen die Zugstränge die Längskonstanz sowie die Teilungsgenauigkeit sichern. Grundsätzlich stehen für den Riemengrundkörper zwei verschiedene Basiswerkstoffe zur Verfügung. Zum Einen, der mit hohen Anteilen im Fahrzeugbau verwendete Gummi- bzw. Neopren-Zahnriemen und der mit einem breiten Anwendungsfeld in weiten Teilen der Technik verwendete Zahnriemen aus Polyurethan. Die synchrone Bewegungsübertragung wird durch den Eingriff der Riemenzähne in entsprechend verzahnte Zahnscheiben erreicht. Durch die Zugfestigkeit der Fasern bzw. der Litzen und der Verformbarkeit des Zahnwerkstoffes ergibt sich ein Gesamtsystem, welches große Kräfte formschlüssig übertragen und Eingriffsungenauigkeiten ausgleichen kann.

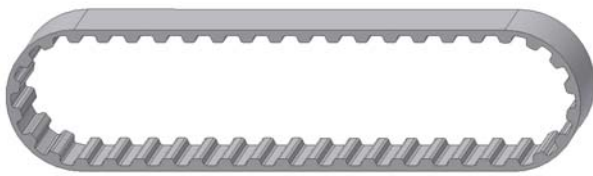


Abbildung 2.1: endloser Zahnriemen

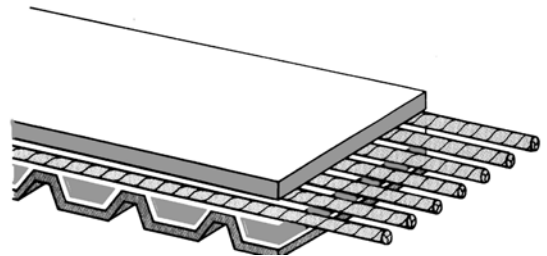


Abbildung 2.2: Zahnriemenaufbau

Für die vollständig eingebetteten längsstabilen Zugträger in Zahnriemen steht heute ein breites Spektrum an Materialien zu Verfügung. In Gummiriemen werden meist Glaskorde oder Aramidfasern verwendet. In Polyurethanriemen kommen häufig Stahllitzen oder Aramidfasern zum Einsatz. Weiterentwicklungen erschließen auch neue Materialien wie z. B. Karbonfasern für spezielle Anforderungen [FAR07]. Die mechanischen Eigenschaften der Zahnriemen können wesentlich durch die Anordnung, die Schlagrichtung der verdrehten Zugträger, deren Anzahl und Einzelfilamentdurchmesser und deren Oberflächenbehandlung beeinflusst werden. Damit verändert sich die Biegewilligkeit, das Anlaufen an die Bordscheiben und der kleinste zulässige Biegeradius.

Eine stabilisierende und schützende zahnseitige Polyamidgewebesicht ist bei Gummizahnriemen notwendig und wird oft auch bei Polyurethan-Zahnriemen vorgesehen, um den Reibwert zu senken und den Verschleiß zu mindern.

Gummizahnriemen werden im Vulkanisationsverfahren im Wickel hergestellt und auf die erforderliche Breite geschnitten. Dabei ist für jede Riemenlänge ein eigenes Werkzeug notwendig. Polyurethanriemen können je nach Verfahren als Riemen mit fester Zähnezahl aus sich venetzenden, duroplastischem Polyurethan gegossen oder als endliches oder endloses Band aus thermoplastischen Polyurethan extrudiert werden. In beiden Fällen entsteht ein Riemen mit elastischer Matrix und längsstabilen Zugträgern. Bei der Konfektionierung von Zahnriemen aus Band kann ein Riemen mit beliebiger Zahnzahl hergestellt werden. Die Verbindestelle der Zahnriemen stellt, durch die Unterbrechung der Zugträger, eine Schwachstelle im Riemen dar.

Am Markt gibt es eine Vielzahl von Zahnriemenprofilen, welche für die unterschiedlichsten Aufgaben von verschiedenen Herstellern angeboten werden. Einige sind in Normen erfasst, wie z. B. metrische Trapezprofile (T) in DIN 7721-1 und Trapezprofile in Zollabmessung in DIN ISO 5296. Das Trapezprofil stellt die ursprüngliche Form der Zahnriemen dar und wurde von der Firma Uniroyal 1946 patentiert [FOR46, NAG05]. Die steigenden Anforderungen an Zahnriemen in Hochleistungsantrieben machten es notwendig, neue Zahnriemenformen zu entwickeln, um die Leistungsübertragung sicherzustellen. Das Abscheren der Zahnfüße beim Trapezprofil führte zur Entwicklung von Hochleistungsprofilen. Durch Änderung der Zahnform können Spannungsüberhöhungen am Zahnfuß vermindert werden und die Kraft wird besser in den Zugstrang eingeleitet.

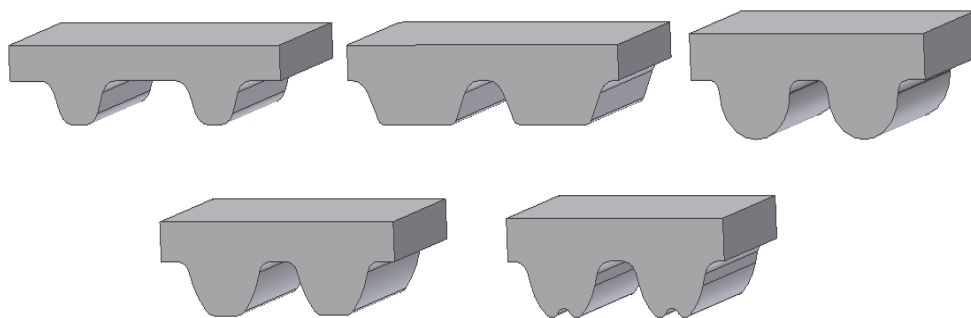


Abbildung 2.3: Riemenprofile: Trapezform (T), Trapezform Hochleistungsprofil (AT), Kreisform (HDT), Parabolform (S), Parabolform mit Einkerbung (RPP)

Die wichtigsten Formen sind u.a. die Hochleistungsprofile Trapezform (AT), Kreisform (HTD), Parabolform (S), Trapezform mit Einkerbung (ATP) und Parabolform mit Einkerbung (RPP, OMEGA). In Abbildung 2.3 sind verschiedene Profilformen für gleiche oder ähnliche Teilungen maßstabsgerecht dargestellt. Diese Profile wurden entwickelt, um je nach Anwendungsfall eine bessere Krafteinleitung am Zahn zu gewährleisten, geringere Reibungsverluste durch Relativbe-



wegung zwischen Zahnscheibe und Riemen sicherzustellen oder um Laufgeräusche bei hohen Riemengeschwindigkeiten zu verringern.

Die Entwicklung von Zahnriemen ist mit den bereits eingeführten Riemen nicht abgeschlossen, da durch entsprechende Anforderungen der Anwender und neue technische Möglichkeiten immer innovativere Produkte am Markt platziert werden. Zu nennen sind hier z. B. die Bogenverzahnung mit geringerem Platzbedarf durch Wegfall der Bordscheiben und besonderer Laufruhe durch Verminderung des Polygoneffektes.



*Abbildung 2.4: Zahnriemen mit Bogenverzahnung*  
[MUL08]

Gegenüber Ketten besitzen Zahnriemen den Vorteil, dass sie für höhere Geschwindigkeiten geeignet sind, leichter sind und auch kein Gelenkverschleiß auftreten kann. Zunehmend verdrängen sie die bisher zur Anwendung kommenden Zugmittel.

Das Ergebnis der Entwicklung von Werkstoffen und Zahngeometrien ist ein Antriebselement, welches neben den Vorteilen der Kettentriebe, wie winkelgenaue und schlupffreie Kraftübertragung, weitere Vorteile besitzt:

- hoher Wirkungsgrad,
- Geräuscharmheit,
- wartungsarmer Betrieb ohne Schmierung,
- hohe Riemengeschwindigkeiten,
- große Übersetzungen möglich,
- Eignung für Reversierbetrieb und große Achsabstände,
- Eignung für Mehrwellenantrieb,
- relativ hohe Verschleißbeständigkeit des PUR,
- gute Verschweißbarkeit des thermoplastischen Polyurethans,
- Beständigkeit gegenüber Ölen, Fetten, Säuren und Laugen, jedoch weniger bei TPU;
- keine Korrosion auch bei extremen Umgebungsbedingungen,
- hohe Wirtschaftlichkeit durch einfache, massearme Gesamtkonstruktion,
- geringer Polygoneffekt,
- Dämpfungseigenschaften des Elastomers,
- ein vielfältiges Angebot an Beschichtungen oder modifizierten Oberflächen für einen optimalen, den technologischen Erfordernissen angepassten Betriebsablauf,
- vorteilhafte Befestigung von fördergutspezifischen Mitnehmern auf den Zahnriemenrücken.

Ein wesentlicher Nachteil bei herkömmlichen Zahnriemen mit bzw. ohne Gewebebeschichtung ist die geringe Temperaturbeständigkeit bis max. 80° Celsius. Zahnriemen mit deutlich höheren Temperaturbeständigkeiten werden für spezielle Einsatzzwecke angeboten.

Der Zahnriemenrücken kann ebenfalls je nach Erfordernis modifiziert werden. Bei außen liegender Spannrolle wird häufig eine Beschichtung mit Polyamidgewebe vorgesehen, um Reibwert und Verschleiß zu verringern. Wird der Riemen als Transportelement eingesetzt, ist es notwendig, diesen entsprechend der Fördergüter und der technologischen Erfordernissen anzupassen. Dabei kann es notwendig sein, den Reibwert zwischen Fördergut und Riemenrücken niedrig zu gestalten, um z. B. eine Relativbewegung bei Staubetrieb zuzulassen oder den Reibwert zu erhöhen, um ein Rutschen bei Steigungen/ Gefällestrecken oder Anfahrbewegungen zu vermeiden. Durch das Aufschweißen von Mitnehmern ist das genaue Positionieren von Fördergütern für zusätzliche Handlingoperationen möglich.

### **Polyurethane**

PUR-Elastomere werden aus drei Hauptkomponenten synthetisiert. Durch Verknüpfen von Polyolen, Diisocyanaten und Diolen entsteht ein segmentartiger Aufbau. Die Hart- und Weichsegmente tragen durch ihre Anordnung in unterschiedlicher Weise zum Eigenschaftsspektrum der PUR-Elastomere bei. Durch die begrenzte Vernetzung der Makromoleküle entstehen die Elastomereigenschaften. PUR-Elastomere können im Gießverfahren als Duroplaste, als thermoplastisches PUR im Spritzgieß- oder Extrusionsverfahren oder als PUR-Kautschuk mit Verfahren der Gummiindustrie verarbeitet werden.

Durch Variation der chemischen Struktur lassen sich PUR-Elastomere in einem weiten Eigenschaftsspektrum herstellen. Der breit einstellbare Härtebereich ist vor allem im Bereich von 70 bis 95 Shore A interessant. Polyurethane besitzen hohe mechanische Festigkeit, guten Weiterreißwiderstand, hohe Verschleißfestigkeit bei guter Elastizität. Polyurethane erschließen das Gebiet zwischen dehnbaren Weichgummitypen und den hartelastischen Kunststoffen. Der Temperatureinsatz reicht für Standardtypen von -30°C bis +80°C, für spezielle Mischungen von -70°C bis +120°C. Für Zahnriemen werden sowohl duroplastische als auch thermoplastische PUR-Mischungen verwendet. [DOM08, LÜT84, UET86, UHL98]

## **Zugstrangmaterial**

### **Stahllitzen-Zugträger**

Zu den Haupteigenschaften der hochfesten Stahllitzen zählen ein hoher E-Modul und eine hohe Kriechfestigkeit. Der Einsatz kann blank, verzinkt, mit Messing überzogen oder aus Edelstahl-draht mit Durchmessern von teilweise weniger als 100  $\mu\text{m}$  erfolgen. Eine galvanisierte Schicht verbessert den Korrosionswiderstand. Für die Anbindung an das Matrixmaterial ist das Aufbringen einer Schliche als Haftvermittler notwendig. Die Eigenschaften der Zugträger wird wesentlich vom Seilaufbau, der Einzelfilamentdurchmesser, der Schlagrichtung und der Schlaglänge beeinflusst. [WIT06]

### **Glaskord-Zugträger**

Hohe Biegeweichselfestigkeit bei guter Längsstabilität zeichnen die Glaskord-Zugträger aus. Im Automobil wird heute ganz überwiegend Glaskord für den Zugstrang eingesetzt. Glaskord ist ein verzwirnter und präparierter Festigkeitsträger aus Glas. Die Einzelfilamentdurchmesser können weniger als 5  $\mu\text{m}$  betragen. Die Präparierung mit einem Haftsystm, der so genannten Schlichte, verbessert die Haftung an das Matrixmaterial und wirkt als Schutzschicht und verringert dadurch den Festigkeitsabbau durch Hydrolyse. Ein wesentlicher Nachteil ist eine gewisse Sprödigkeit und Knickempfindlichkeit. [TER05]

### **Aramid-Zugträger**

Mit Aramidfäden als Zugträger können nahezu ebenso hohe Kräfte übertragen werden wie mit einem Stahlkordzugträger. Aramid-Fasern zeichnen sich durch eine hohe Biegeweichselfestigkeit und Kerbschlagfestigkeit aus, wodurch der Zugkörper auch Stoßbelastungen und Schwingungen ertragen kann. Das Material besitzt eine sehr hohe Steifigkeit bei dennoch guten Dämpfungseigenschaften.

### **Kohlefaser**

Der Zugstrang aus Karbonfaser gewährleistet die Übertragung sehr hoher Kräfte bei kompakter Bauweise. Die Biegeweichselfestigkeit der Fasern ist sehr hoch und ihre Schlagzähigkeit sorgt für eine Widerstandsfähigkeit gegenüber Stoßbelastungen, deutlich höher als die von Aramid. Durch die sehr geringe Dehnung bleibt die Riemenspannung über die gesamte Lebensdauer konstant. Die hohe Biegefestigkeit erlaubt die Anwendung kleiner Riemenscheiben sowie den Einsatz von Rückenspannrollen ohne das Leistungsvermögen einzuschränken. [FAR07]

## 2.2 Aufbau von Zahnriemenförderern und Einsatzformen

Zahnriemenförderer eignen sich zur Positionierung von Werkstückträgern und zum gleichzeitigen Ausführen von Arbeits- und Montageschritten, wie z. B. Fügen und Schrauben.

Auf Grund ihrer wirtschaftlichen und technischen Vorteile im Bereich der leichten und mittelschweren Stückgüter haben sie ein breites Anwendungsfeld in den verschiedensten Branchen der Industrie erreicht und gewinnen weiterhin an Bedeutung.

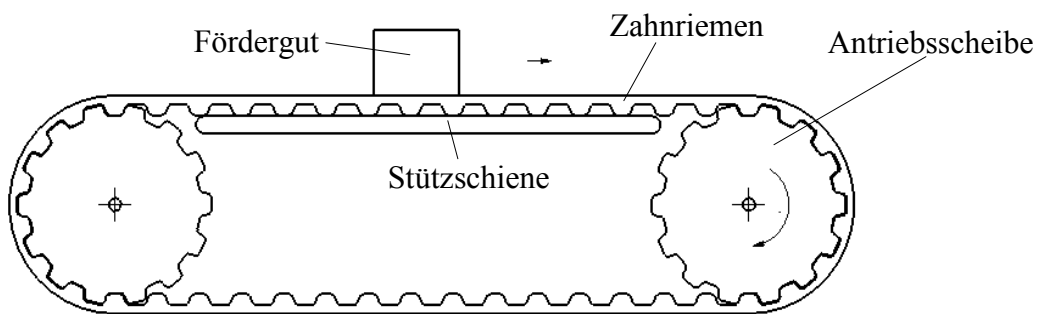


Abbildung 2.5: prinzipieller Aufbau eines Zahnriemenförderers

Der prinzipielle Aufbau eines Zahnriemenförderers ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Für den Stückguttransport ist es charakteristisch, dass das Fördergut direkt vom Zahnriemen aufgenommen wird. Für den Transport von Werkstückträgern, langen oder großflächigen Gütern, ist eine parallele zwei- bzw. mehrsträngige Anordnung möglich. Die Gutmasse wird direkt durch den Zahnriemen in die darunter liegende Stützschiene ins Gestell eingeleitet. Der Zahnkopf gleitet auf der Stützschiene, wobei in dieser Gleitpaarung je nach Gutmasse und Reibwert die zu überwindenden Widerstandsmomente entstehen. Typische Antriebsformen sind der so genannte Kopf- bzw. der Mittelantrieb, bei denen die Zähne der Antriebsscheiben formschlüssig in die Riemenverzahnung eingreifen. Eine notwendige Vorrichtung zum Spannen der Riemen ist nicht dargestellt. Je nach Gut sind Seitenführungen vorzusehen. Die seitliche Führung des Riemens erfolgt über Bordscheiben bzw. über einen aufgeschweißten Spurkeil auf der Zahnseite.

Stückgüter können von Zahnriemen durch Kraft- oder Formschluss transportiert werden. Der Einsatz ist von den technologischen Erfordernissen und der Art des Transportgutes abhängig.

Bei der kraftschlüssigen Variante können zwei grundlegende Arten unterschieden werden, zum Einen Zahnriemenbeschichtungen mit sehr hohem Reibwert zum anderen mit sehr niedrigen Reibwerten, je nach Aufgabenstellung.

Beschichtungen mit sehr hohem Reibwert (z. B. PUR-Schaum, Naturkautschuk) eignen sich besonders für Schrägförderer und Abzugsbänder sowie für einfache Positionieraufgaben. Dabei

wird eine relative Verschiebung des Gutes zum Zahnriemen durch den hohen Reibwert in der Kontaktzone behindert.

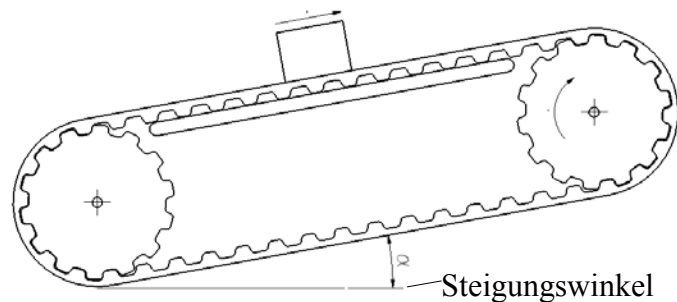


Abbildung 2.6: reibschlüssiger Schrägförderer

Soll ein Gut schräg gefördert werden (aufwärts, abwärts), so muss die Bedingung nach Gleichung 2.1 für den Reibwert zwischen Gut und Riemenrücken erfüllt sein. Ist der Reibwert kleiner, kommt es zu einer Relativbewegung zwischen Gut und Förderriemen: das Gut rutscht beim Fördern.

$$\mu > \tan \alpha \quad (2.1)$$

Wird das Gut nicht gleichförmig bewegt, treten Beschleunigungen durch Geschwindigkeitsänderungen bzw. Anfahrbewegungen auf, so ist Gleichung 2.2 für eine Gutbewegung ohne Schlupf zwischen Gut und Riemenrücken zu erfüllen. Die Gleichung 2.2 gilt sowohl in der Ebene als auch bei Schrägförderung.

$$\mu > \frac{a}{(g \cdot \cos \alpha)} \quad (2.2)$$

Zahnriemenrückenbeschichtungen mit geringen Reibwerten bestehen meist aus Polyamidgewebe und eignen sich besonders gut für den so genannte Staubetrieb. Hierbei dient der Zahnriemen selbst als Tragmittel mit zusätzlicher Funktion als Zwischenspeicher. Bei Bedarf können die Güter freigegeben werden. Dabei muss aber sichergestellt werden, dass auch die Auflagefläche des Fördergutes für einen solchen Einsatzzweck geeignet ist, da es zu einer Relativbewegung zwischen Gut und Zahnriemen kommt.

Ist eine exakte Lage und Ausrichtung der Transportelemente zu gewährleisten bzw. ist die Form der Güter für einen ausgerichteten Transport ungeeignet, ist eine Lagesicherung durch ein Formnest möglich. Die Art und Gestalt des auf dem Zahnriemenrücken aufgebrachten Formelementes wird vom Gut selbst und dem Einsatzzweck bestimmt. Eine Vielzahl von verschiedenen Elementen wird von der Industrie standardmäßig angeboten. Die Befestigung der entsprechenden Mitnehmer auf dem Riemenrücken erfolgt durch Kleben, Schweißen oder spezielle Schraubverbindungen.

Diese Art des Transports wird verwendet, wenn Teile:

- vereinzelt,
- genau positioniert,
- zeitlich exakt getaktet,
- über starke Steigungen bis hin zum Vertikalen transportiert werden müssen, bzw.
- sich gegenseitig nicht berühren dürfen.

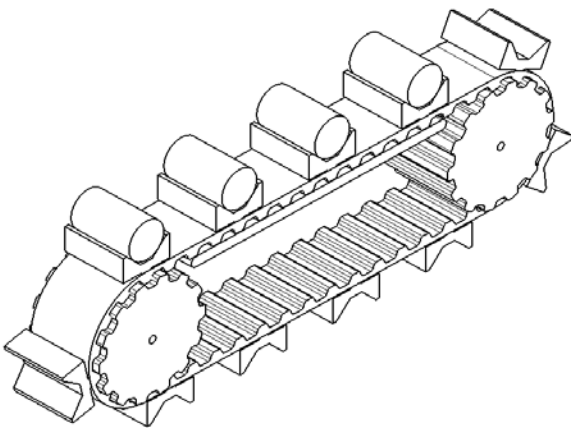


Abbildung 2.7: Gutmitnahme durch Formelemente

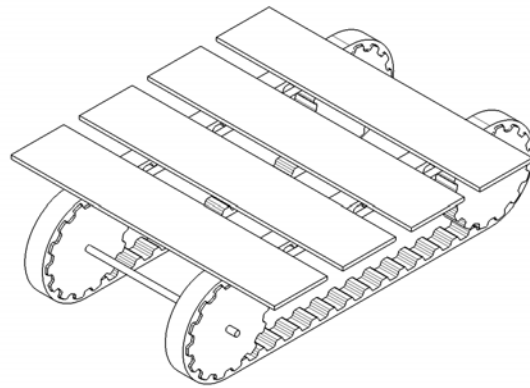


Abbildung 2.8: Förderer für großflächige Teile

In Abbildung 2.7 ist ein Förderer für zylindrische Teile schematisch dargestellt. Eine Schrägförderung ist möglich. Die Gutaufnahme bzw. -abgabe kann durch Greifer taktgenau erfolgen und weiteren Bearbeitungsschritten zugeführt werden.

Sind großflächige Teile zu transportieren und ist synchrones Fördern gefordert, ist eine Ausführung von Zahnriemenförderern in mehrsträngiger Anordnung möglich (Abbildung 2.8). Dabei muss die Koppelung der Antriebscheiben sichergestellt sein, um eine synchrone Bewegung der Zahnriemen zu gewährleisten.

Parallelförderer können sowohl als reibschlüssige als auch als formschlüssige Variante ausgeführt werden. Ihr Vorteil liegt darin, dass größere Güter, z. B. Flachglas, Bleche usw. auf zwei oder mehreren Riemen aufliegen und durch die gleiche Geschwindigkeit der synchron angetriebenen Riemen keine Verschiebung des Gutes erfolgt. Würde der Antrieb nicht über Zahnriemen erfolgen, sondern über Flachriemen bzw. Gurte, wäre ein Zugmittel in der Breite des Fördergutes notwendig. Daraus ergibt sich zusätzlich eine wesentliche Massenreduzierung der Zugmittel für diese Anwendungen.

Biegeschlaife Materialien wie Stoffe oder Folien können durch Abzugsbänder gefördert werden. Dabei werden die zu bewegenden Güter mit geringer Masse durch zwei übereinander liegende

Zahnriemenförderer über Federkraft (Abbildung 2.9) oder über umlaufende Magnete geklemmt. Durch den synchronen Lauf wird eine Verschiebung der Flachformkörper vermieden.

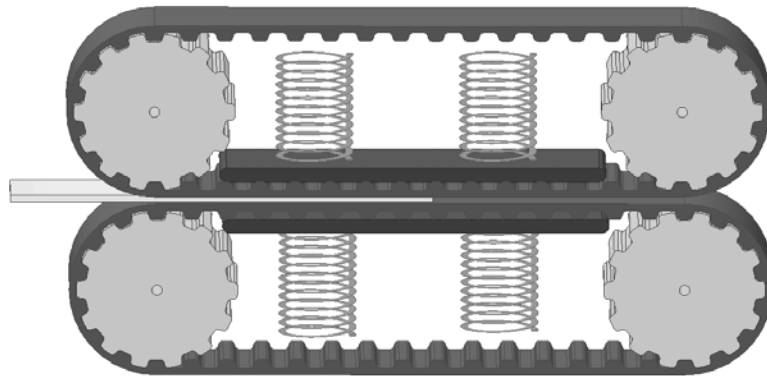


Abbildung 2.9: Abzugsband für biegeschlaffe Flachformkörper

Weitere Modifizierungen des Riemens sind beispielsweise das Anbringen von Magneten, die Ausführung als Vakuumriemen für die schnelle Beförderung von leichten Gütern oder die anti-statische Beschichtung für den Transport von elektronischen Baugruppen. Diese werden meist in Absprache mit Zahnriemenherstellern oder -veredlern auf Anwenderwunsch hin realisiert.

Allen diesen Varianten ist jedoch gemeinsam, dass der Zahnriemen auf einer Stützschiene gleitet und die Normalkraft des Transportgutes in das Gestell abgeführt wird. Es kommen verschiedene Materialien sowie unterschiedliche Ausführungen zur Anwendung. Üblicherweise werden Kunststoffe, wie Polyethylen oder Polyamid oder aber Metalle, wie Stahl und Aluminium eingesetzt.

Weit verbreitet ist das C-Profil aus Stahl, welches am Gestell befestigt, die eigentliche Stützschiene aufnimmt (Abbildung 2.10). Diese trägt die Zahnseite der Riemen und gibt gleichzeitig eine seitliche Führung.

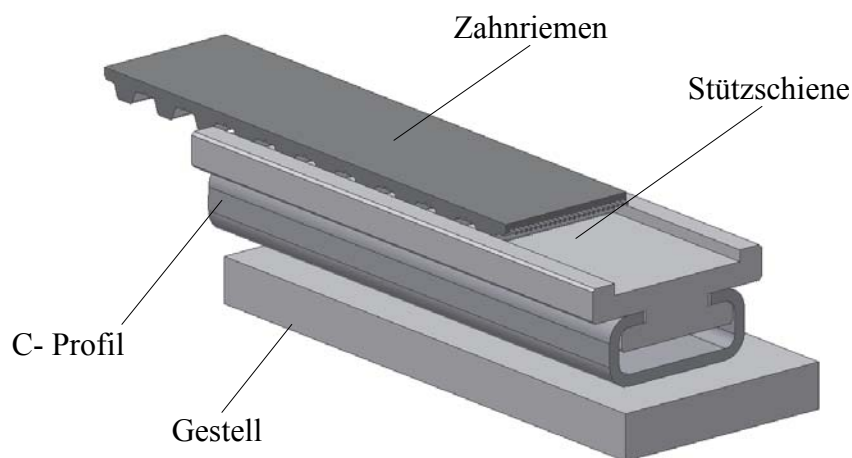


Abbildung 2.10: Zahnriemen mit Gleitschiene in C-Profil

## 2.3 Belastung und Auslegung von Zahnriemenförderern

### 2.3.1 Beanspruchung am Zahnriemenförderer

Die Auslegung von Zahnriemenförderern, insbesondere die der Zug- und Tragmittel ist Aufgabe des Konstrukteurs. Die Zahnriemenhersteller geben dem Anwender in entsprechenden Produktkatalogen und Software-Programmen die Dimensionierungsvorschriften für ihre Produkte in die Hand. Diese Vorschriften unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller erheblich, neben den grundsätzlichen theoretischen Traglasten eines Zahnriemens wird die Lebensdauer erheblich von den Erfahrungen im Einsatz bestimmt und sind somit kaum vorhersehbar.

Die Berechnungsvorschriften sind so gestaltet, dass der Anwender aus technologischen und konstruktiven Parametern anhand von Tabellen, Diagrammen, Zuschlagsfaktoren und Berechnungen die geeigneten Zahnriemen auswählen kann. Die in den Katalogen angegebenen Belastungsgrenzen und Leistungsdaten sind durch Prüfstandversuche und Praxisergebnisse ermittelt. In der Regel lassen sich die Werte von verschiedenen Herstellern nicht vergleichen, da diese auf unterschiedlichen Lebensdauerwerten und Prüfbedingungen basieren.

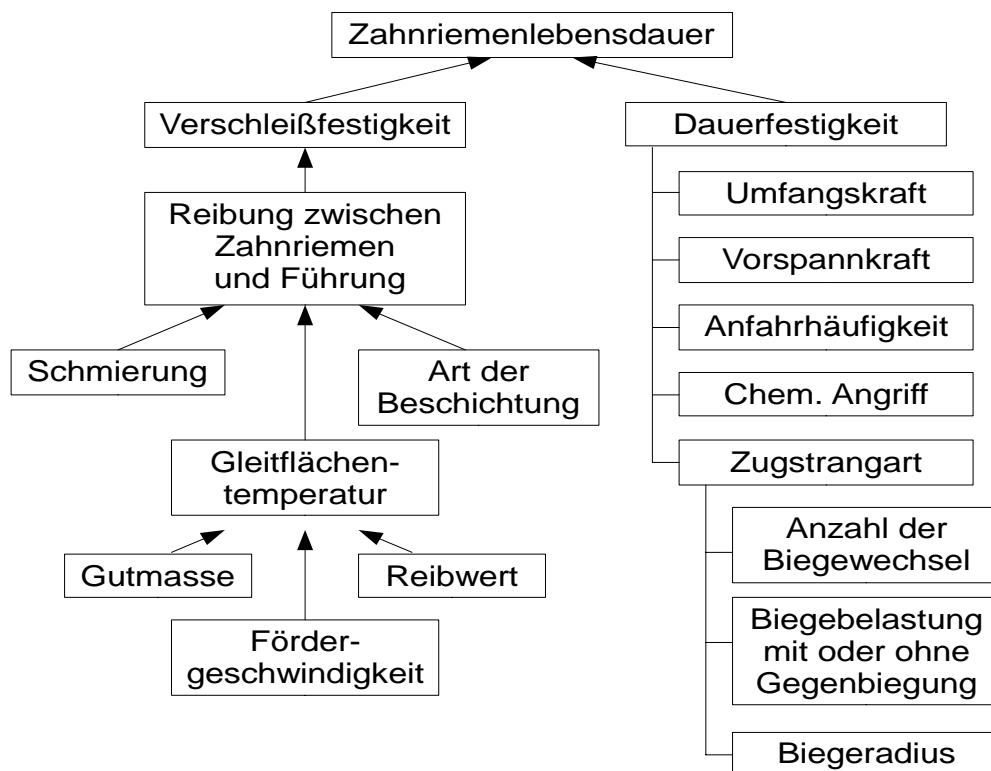


Abbildung 2.11: Einflüsse auf die Zahnriemenlebensdauer

Eine entsprechende Fördereinrichtung soll eine genügend lange Lebensdauer aufweisen und die geforderte Leistung sicher übertragen. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Riemen von Förderern sind in Abbildung 2.11 dargestellt.



Die in Fachbüchern der Konstruktionstechnik und Maschinenelemente beschriebenen Verfahren lehnen sich häufig an Verfahren einzelner Hersteller an und sind meist nur für spezielle Produkte anwendbar. Eine DIN-Norm, ISO-Norm oder VDI-Richtlinie für die vollständige Dimensionierung von Zahnriemenförderern ist nicht verfügbar.

Ein Zahnriemen ist richtig ausgelegt, wenn unter ungünstigsten Betriebsbedingungen und Belastungsfällen die zulässigen Werte für Zahntragfähigkeit, Seilzugfestigkeit und Biegewilligkeit nicht überschritten werden. Bei der Auswertung der Auslegungsmethoden, die gegenwärtig in der Fördertechnik Anwendung finden, wurde festgestellt, dass für die Dimensionierung maßgebende Größen vor allem die Zahntragfähigkeit bzw. die Anzahl der im Eingriff stehenden Zähne, die Biegewilligkeit und die zulässige Zugstrangbelastung der Zahnriemen sind, d. h. die Dimensionierung der Förder-Zahnriemen erfolgt analog wie bei Antriebszahnriemen [ALB06, MEC07, FOR07, MUL08, VDI 2758]. Vernachlässigt werden in diesen Vorschriften die Temperaturerhöhung in der Kontaktzone zwischen Zahnriemen und Stützschiene, die durch die entstehende Reibleistung hervorgerufen wird.

Wesentliche Belastungen für Zahnriemenförderer sind in Abbildung 2.12 aufgeführt. Es ist davon auszugehen, dass sich bestimmte Einflussfaktoren während der Laufzeit ändern und damit die Betriebsbedingungen nicht konstant sind. Werden Ergebnisse aus Prüfstandversuchen und Praxisergebnissen nicht auf ihre Langzeittauglichkeit hin untersucht, kann es zu unvorhersehbaren Ausfällen kommen.

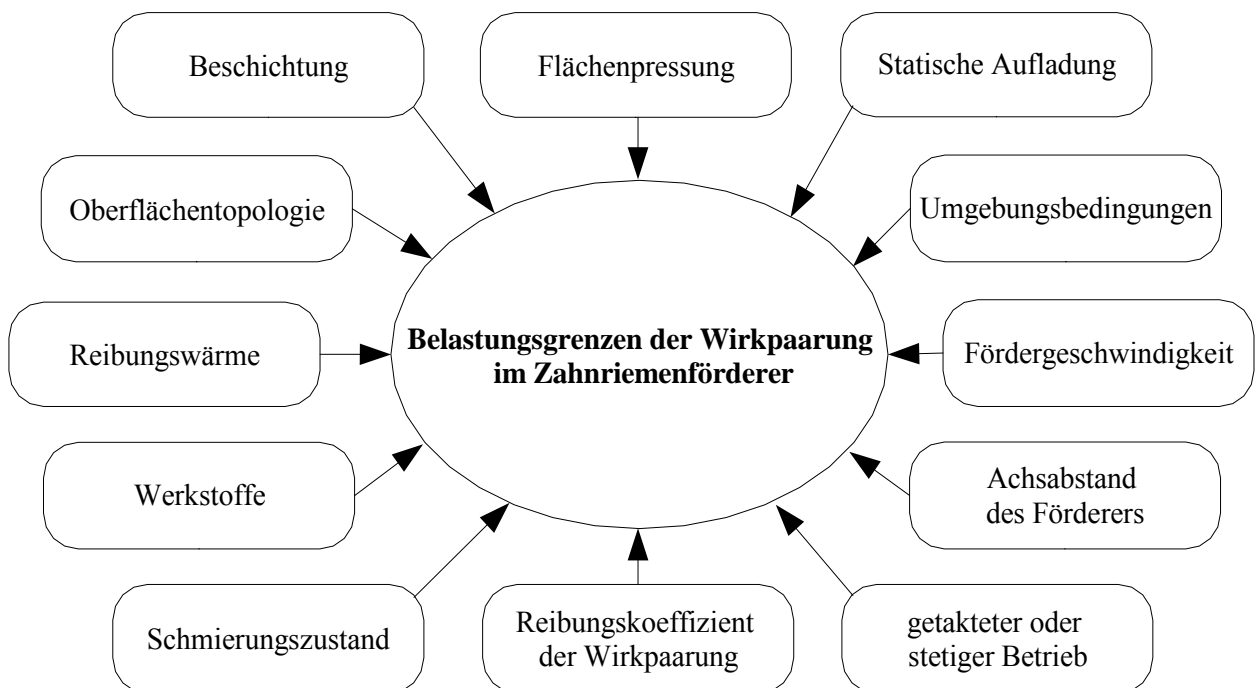


Abbildung 2.12 Belastungen für Zahnriemenförderer

Bei der Bestimmung der wirkenden Umfangskräfte an Transportzahnriemen werden die Art der Förderung des Stückgutes (horizontal, schräg bzw. mit oder ohne Stau), die Einzelmassen der Stückgüter sowie ein konstanter Reibwert zwischen Zahnriemen und Führungsschiene und ggf. ein Reibwert zwischen der Gutunterseite und dem Zahnriemenrücken berücksichtigt. Die Masse der Zahnriemen selbst bleibt meist unberücksichtigt.

Die Berechnung der erforderlichen Zahnriemenbreite erfolgt über die spezifischen Umfangskräfte bzw. Antriebsleistungen, die den Herstellerangaben zu entnehmen sind. Für die Berechnung der Zahnfußfestigkeit wird die Anzahl der tragenden Zähne herangezogen.

Eine Auslegung nach der thermischen Sicherheit, wie z. B. bei Kunststoffgleitlagern, kommt bei keinem Anwender zum Tragen. Durch die hohen Sicherheiten bei der Berechnung auf Zahnfußfestigkeit bzw. Zugstrangbelastung werden die Zahnriemenförderer meist überdimensioniert und die thermische Überlastung oft ausgeschlossen. Sind die Förderstrecken jedoch relativ kurz oder steigt der Reibwert zwischen Zahnriemen und Stützschiene an, kommt es zu einer deutlichen Erwärmung in der Wirkstelle, ohne dass die Zahnfußfestigkeit bzw. Zugstrangfestigkeit überschritten werden. Wird ein Grenzwert überschritten, ist erhöhter Verschleiß bis hin zum Totalausfall wahrscheinlich.

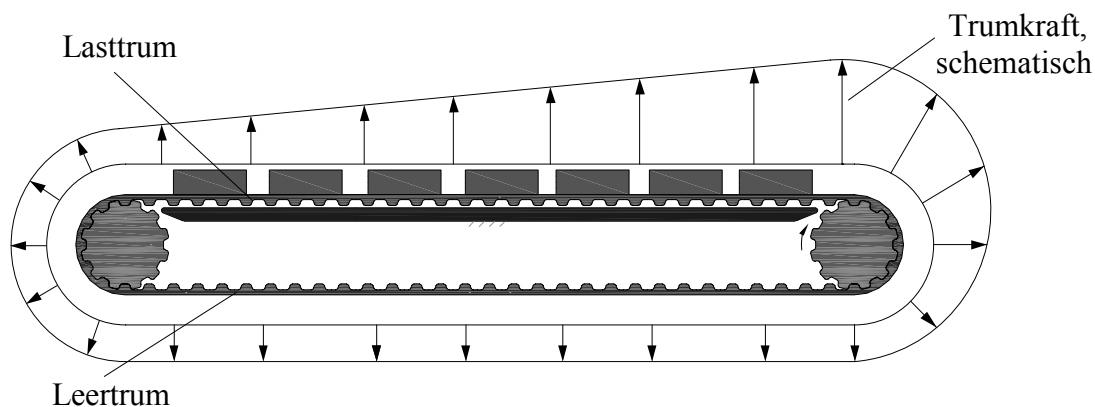


Abbildung 2.13: Belastungsverlauf am Zugmittel für Stückguttransport

In Abbildung 2.13 ist der Belastungsverlauf des Zugstrangs über einen Umlauf dargestellt.

Als Trum wird der gerade Abschnitt eines Zugmittels zwischen zwei Wellen, Antriebs- und Abtriebswelle, bezeichnet, wobei unterschieden wird zwischen dem Last- und dem Leertrum. Der Lasttrum überträgt die Umfangskraft, der Leertrum dient der Rückführung des Zugmittels von Antrieb- zur Abtriebswelle. Speziell bei Zahnriemen als Zugmittel muss die Zugkraft im Leertrum größer Null sein, um ein Überspringen der Zähne des Zahnriemens zu vermeiden. Dies muss auch bei ungünstigen Betriebsbedingungen gewährleistet sein, deshalb sind entsprechende Spanneinrichtungen bzw. -elemente vorzusehen.

### 2.3.2 Dimensionierung von Zahnriemenförderer

Für den sicheren Betrieb von Zahnriemenförderern sind vorhergehende Berechnungen unumgänglich. Dabei werden die Kriterien Zahnfußfestigkeit, Zugstrangfestigkeit und Biegewilligkeit untersucht.

<b>Zugstrangfestigkeit</b>  Ermittlung über die Umfangskraft	<b>Zahnfußfestigkeit</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>•Umfangskraft</li> <li>•spez. Belastbarkeit der Riemenzähne</li> <li>• Eingriffszähnezahl im Kraftfluss</li> </ul>	Prüfung: <b>Biegewilligkeit</b>  Tabellenwert oder Diagrammwert
--	---	--

$$F_u = F_R + F_a + F_H + F_{ST} + \dots$$

$$F_R = m \cdot g \cdot \mu$$

Für die Berechnung Zugstrang- und Zahnfußbelastung ist die Kenntnis des Reibwertes zwischen Zahnriemen und Stützschiene notwendig.

„Häufig wird die Leistungsfähigkeit von Zahnriemen nicht durch die reine Zugfestigkeit der Zugstränge, sondern durch deren Biegeweichfestigkeit begrenzt, was sich auch in der Größe der benötigten Zahnscheiben zeigt. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass die Festlegung dieser Zähnezahl mit großen Unsicherheiten erfolgt, da exakte Kenntnisse zu auftretenden Belastungen im Inneren des Zugstranges bei Zug und gleichzeitiger Biegung sowie Druckbelastung zwischen den Filamenten in der Regel nicht vorhanden sind.“ [NAG01]

#### Zahnfußfestigkeit

Über die Umfangskraft und die spezifische Riemenzahnbelastbarkeit bei entsprechender Anzahl eingreifender Zähne wird die notwendige Riemenbreite wie folgt berechnet [ALB06, MUL08, VDI 2758].

$$b = \frac{F_U}{(z_e \cdot F_{U\text{spez}})} \quad (2.3)$$

$F_U$	Umfangskraft (berechnet)
$F_{U\text{spez}}$	spezifische Belastbarkeit der Riemenzähne (Tabellen oder Diagramme der Hersteller)
$z_e$	eingreifende Zähnezahl

## Zugstrangbelastung: Ermittlung der Zugstrangbelastung

Die Zugstrangbelastung wird aus der Summe der einzeln auftretenden Kräfte ermittelt. Die Beschleunigungskraft wird meist mit einem Betriebs- und Beschleunigungsfaktor einbezogen. Für die einzustellende Vorspannkraft werden Werte von  $F_V \geq 0,5 \dots 1,2 F_U$  angenommen. Die Staukraft muss nur einbezogen werden, wenn eine Relativbewegung zwischen Fördergut und Riemenrückseite stattfindet.

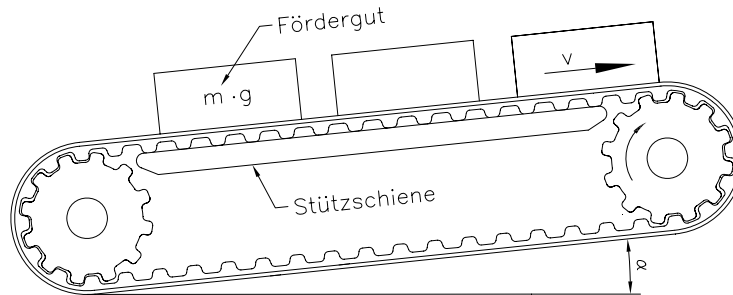


Abbildung 2.14: allgemeiner Förderer, schematisch

Der Zahnriemen ist richtig dimensioniert, wenn unter Betriebsbedingungen die maximal zulässige Zugstrangkraft durch die Summe von Umfangs- und Vorspannkraft nicht überschritten wird.

$$F_{Zst} > F_U + F_V \quad (2.4)$$

Die Umfangskraft setzt sich aus der Beschleunigungskraft, der Reibkraft, der Staukraft und der Hubkraft zusammen.

$$F_U = F_a + F_R + F_{St} + F_{Hub} \quad (2.5)$$

Die Vorspannkraft berechnet sich nach Anordnung des Antriebs und der Umfangskraft mit:

$$F_V = 0,5 \dots 1,2 \cdot F_U \quad (2.6)$$

Die Beschleunigungskraft wirkt beim Anfahren bzw. Geschwindigkeitswechsel der Förderanlage.

$$F_a = m \cdot a \quad (2.7)$$

Die Berechnung der Beschleunigungskraft wird oft durch die Angabe eines Betriebs- oder Beschleunigungsfaktor ersetzt.

Die Reibkraft wirkt zwischen Zugmittel und Abstützung, bei Steigungen mit dem Winkel  $\alpha$  entsprechender Komponente.

$$F_R = \cos(\alpha) \cdot m \cdot g \cdot \mu_F \quad (2.8)$$

Die Staukraft tritt nur bei Relativbewegung von Gütern auf dem Riemenrücken (Staubetrieb) auf.

$$F_{st} = \cos(\alpha) \cdot m \cdot g \cdot \mu_G \quad (2.9)$$

Der Hubkraftanteil ist nur bei schrägem Transport in die Berechnung der Umfangskraft einzubeziehen.

$$F_{Hub} = \sin(\alpha) \cdot m \cdot g \quad (2.10)$$

Die einzelnen Kräfte werden je nach Berechnungsverfahren mit Betriebs- oder Sicherheitsfaktoren erweitert.

**Biegewilligkeit:** Tabellenwert / Diagramm

Je nach Riementyp werden unterschiedliche Mindestzähnezahlen bzw. Mindestdurchmesser für den Betrieb empfohlen. Zu beachten sind die entsprechenden Hinweise zur Vergrößerung der Mindestzähnezahlen bzw. Mindestdurchmesser bei Riemenanordnungen mit Gegenbiegung durch Spannrollen.

Dieser Ansatz für die Auslegung von entsprechenden Förderern wird von allen Zahnriemenherstellern verfolgt und in mehr oder minder abgewandelter Form angegeben. Teilweise werden Berechnungen durch Tabellen, Diagramme bzw. Zuschlagsfaktoren ersetzt.

Die Fördergeschwindigkeit wird nur indirekt durch die Geschwindigkeitsabhängigkeit der zulässigen Zugstrangkraft berücksichtigt.

Die für die Berechnung der Zugstrang- und Zahnfußfestigkeit erforderliche Umfangskraft ergibt sich aus der Summe der Einzelkräfte. Oft wird für die Berechnung die Reibkraft mit Betriebs- und Beschleunigungsfaktoren multipliziert und dieser Wert für die weiteren Auslegungen verwendet. Insbesondere die Reibkraft ist jedoch schwierig zu ermitteln, da gesicherte Erkenntnisse für den Reibwert  $\mu$  bei einem längeren Betrieb bzw. für die entsprechenden Paarungen und Belastungen fehlen. Da der Reibwert linear in die Reibkraft einfließt, ist die Gefahr von Unter- bzw. Überdimensionierungen bei Zugstrangfestigkeit und Zahnfußfestigkeit gegeben.

### Thermisches Auslegungskriterium

Die Erwärmung des Systems durch die entstehende Reibleistung im Kontaktbereich ist in keiner Berechnungsvorschrift der einzelnen Hersteller verankert.

Die erzeugte Reibleistung ist linear vom Reibwert abhängig und führt zu Erwärmung der Gleitpaarung.

$$\dot{Q}_{\text{erz}} = P_R = F_N \cdot \mu \cdot v \quad (2.11)$$

Die Abführung der Reibungswärme erfolgt hauptsächlich durch Wärmeleitung und Konvektion:

$$\dot{Q}_{\text{abg}} = \Delta T \cdot A \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s}{\lambda}} \quad (2.12)$$

Nach einer entsprechenden Erwärmungsphase stellt sich ein stationärer Zustand ein, die erzeugte Reibleistung wird vollständig aus dem System abgeführt.

Die zulässige Temperaturerhöhung ist von den thermischen Einsatzgrenzen der beteiligten Gleitpartnern und den Umgebungsbedingungen abhängig

$$\Delta T_{\text{zul}} = T_{\text{zul}} - T_u \quad (2.13)$$

Die Kenntnis der Temperaturdifferenz zwischen Wirkstelle und Umgebung und damit die Kenntnis der Kontakttemperatur, ist insbesondere bei Polymeren entscheidend, da ihre Eigenschaften meist temperaturabhängig sind.

## 2.4 Ziel der Arbeit

Die bisherige Auslegung von Fördersystemen beschränkt sich im Wesentlichen auf die Zugstrangfestigkeit und die Zahnfußfestigkeit des Zahnriemens, wobei nur vage Aussagen zur Höhe der Reibwerte zur Verfügung stehen und die thermische Interaktion zwischen Stützschiene und Zahnriemen vernachlässigt wird. In der Praxis wird oftmals auf Erfahrungswerte zurückgegriffen, wobei die Gefahr der Über- bzw. Unterdimensionierung mit erheblichen Auswirkungen auf die Lebensdauer, das Verschleißverhalten und die Betriebssicherheit gegeben ist.

Eine gezielte Kombination von Stützschiene material und Zahnriemen ausführung auf Grundlage von wissenschaftlichen Untersuchungen, insbesondere zur Kontakterwärmung, konnte weder in Veröffentlichungen noch in den Auslegungsvorschriften einzelner Hersteller und Anbieter gefunden werden [ALB06, FOR07, MEC07, MUL08]. Besonders den Reibungs- und Verschleißverhältnissen, unter dem Einfluss von Zeit und Kontakttemperatur auf Grund der eingebrachten

Reibleistung, wurde bisher kaum Aufmerksamkeit beigemessen. Die Kenntnis der Reibungsverhältnisse und ihre Veränderung sowie die daraus resultierende Erwärmung der Wirkpaarung, ist jedoch für die Ermittlung der Grenzbelastung der Förderanlage und die Bestimmung der Antriebsleistung von entscheidender Bedeutung.

Abgeleitet von der nicht zufriedenstellenden Auslegungsproblematik ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, verschiedene, in der Praxis angewandte Zahnriemen-Stützschielenkombinationen auf ihre tribologischen Eigenschaften hin zu untersuchen und eine geeignete Möglichkeit der thermischen Dimensionierung zu erarbeiten, die möglichst viele technologische und konstruktive Parameter einbezieht.

Im Kapitel „Grundlagen“ werden zunächst der aktuelle Kenntnisstand zu Reibung und Verschleiß, zum thermischen Verhalten und der Aufbau und die Auslegungsmethoden von Zahnriemenförderern dargestellt. Dabei werden die Modellvorstellungen am Zahnriemenförderer bewertet und eine Analyse der Belastungen vorgenommen.

Um Aufschluss über die tribologischen Eigenschaften, Reibung und Verschleiß sowie das thermische Verhalten zu erhalten, wurden experimentelle Untersuchungen mit verschiedenen Zahnriemen und Gleitschienvarianten durchgeführt. Aus diesen Versuchen wurden Vorzugsvarianten ermittelt, welche in Dauerversuchen mit einem praxisnahen Belastungsspektrum beaufschlagt wurden, um die Grenzbelastung und die Lebensdauer zu ermitteln.

Die Zielstellung der Arbeit ist es, das Gleitschienen – Zahnriemensystem mit seinen verschiedenen Materialpaarungen zu analysieren und mit den Ergebnissen der Untersuchungen zu verknüpfen, um ein Dimensionierungsmodell zur Berechnung der Einsatzgrenzen und der Lebensdauer zu erstellen bzw. anwendungsoptimierte Materialpaarungen auszuwählen.

Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die tribologischen Eigenschaften der Zahnriemenförderer in der Kontaktzone Zahnriemen-Stützschiene unter praxisnahen Bedingungen. Unberücksichtigt bleiben zunächst Einsatzbedingungen unter extremen Bedingungen, wie z. B. hohe bzw. niedrige Umgebungstemperaturen und -schwankungen, Anwesenheit von abrasiven Stoffen, Wasser oder anderen Medien. Um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Untersuchungen zu gewährleisten, wurden sowohl Riemenbreite und Länge als auch die geometrischen Abmessungen der Stützschielen nicht variiert.





## 3 Grundlagen

### 3.1 Reibung

#### 3.1.1 Allgemeine Tribologie

Als Reibung bezeichnet man den Widerstand, der in der Berührungsfläche zweier Körper bei ihren relativen Bewegungen zueinander auftritt, oder zwischen Teilchen eines Stoffes, die sich relativ zueinander bewegen. Die zuerst genannte Reibung heißt „äußere Reibung“. Die zweite Form der Reibung heißt „innere Reibung“ und bestimmt die Viskosität, d. h. den Widerstand beim Fließen von Gasen, Flüssigkeiten aber auch von festen Körpern. Physikalisch wird die Reibung durch eine Maßzahl für die zur Bewegung erforderliche Kraft repräsentiert [UET85, CZI82].

Die äußere Reibung ist in DIN ISO 4378 definiert und soll im Weiteren näher betrachtet werden. Bei ihr findet eine irreversible Energiedissipation statt, welche die zugeführte kinetische Energie in andere Energieformen umwandelt. Der größte Teil dieser Energie wird in Reibungswärme umgeformt, ein anderer Teil führt zu elastischen und plastischen Deformationen sowie zu Tribooxidation und Schallemissionen an den Kontaktflächen.

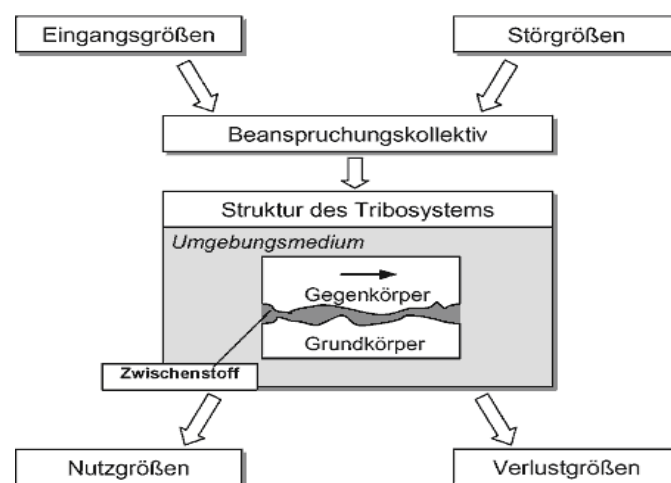


Abbildung 3.1: Tribologisches System nach DIN 50320

Ursache für diesen Widerstand sind einerseits Kräfte zwischen den Molekülen beider Oberflächen, andererseits geometrische Erhebungen. Erhöhungen der einen greifen, in Vertiefungen der anderen Oberschicht. Besonders hoch ist meist die „Haftreibung“. Es muss viel Kraft aufge-

wendet werden, um die eingerasteten Materialien erstmals voneinander zu lösen. Sind beide Flächen einmal in Bewegung, dann wird die zum Ablösen an einer Stelle nötige Kraft an einer anderen, an der das Material einrastet, teilweise wieder gewonnen. Diese Effekte summieren sich zur Gleitreibung, die meist kleiner als die Haftreibung ist. Teilweise wird von sich ausbildenden Schweißbrücken ausgegangen [ROO05].

Gekennzeichnet wird die Reibung durch eine Maßzahl, den Reibwert, meist mit  $\mu$  bzw.  $f$  gekennzeichnet, welche sich aus dem Verhältnis aus Reibkraft  $F_R$  und Normalkraft  $F_N$  ergibt:

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (3.1)$$

Auf Grund der vielen Einflussparameter bei den unterschiedlichen Reibung- und Verschleißarten ist es notwendig, das tribologische System in unterschiedliche Bereiche zu gliedern:

Bewegungsart: Gleitreibung, Rollreibung, Bohrreibung, Wälzreibung

Art der Materialien: Festkörperreibung, Flüssigkeitsreibung, Gasreibung, Mischreibung

Reibungsmechanismen: Adhäsion, Deformation, Energiedissipation, Energieemission

Bei der Reibung treten nach Czichos [CZI82] folgende Mechanismen der Festkörperreibung auf:

- Abscheren und Auflösen von Adhäsionsschweißbrücken
- Plastische Deformation der sich kontaktierenden Rauheitsspitzen
- Furchung durch Rauheitsspitzen im Reibpartner
- Elastische Verformung und Dämpfung im Kontaktgebiet

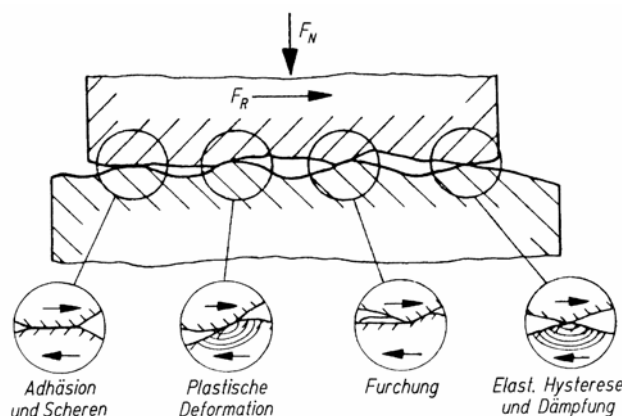


Abbildung 3.2: Mechanismen der Festkörperreibung nach Czichos

Dabei treten diese vier Prozesse einzeln, gemischt oder nacheinander in unterschiedlicher Intensität auf. Dies wird durch die stofflichen Eigenschaften der Reibpartner und das wirkende Beanspruchungskollektiv beeinflusst.

Inzwischen ist durch präzisere Untersuchungsmethoden ein besseres Verständnis für den molekularmechanischen Wirkmechanismus zwischen den Partnern des Tribosystems möglich und damit ein neues Bild von der Reibung entstanden. Dabei wurde festgestellt, dass der Reibwert von vielen Faktoren beeinflusst wird, u. a. durch die Normalkraft und die Gleitgeschwindigkeit.

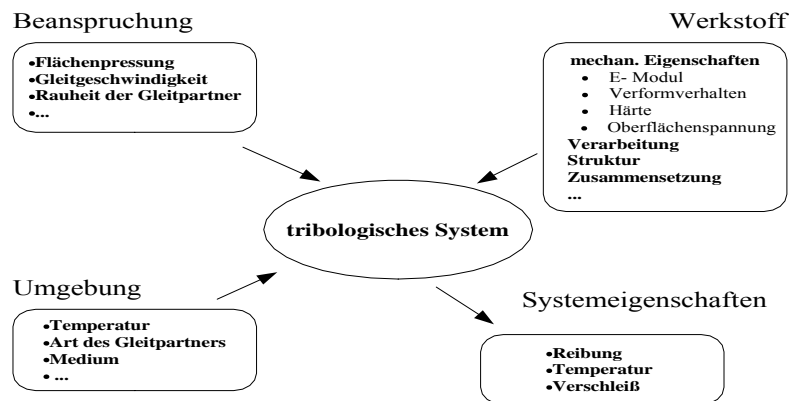


Abbildung 3.3: Einflussfaktoren auf den Reibwert

### Reale Kontaktfläche

Beim Kontakt zweier technischer Oberflächen tritt infolge der Rauheit nur eine diskrete Berührung in Mikrokontakten auf. Es muss also zwischen der geometrischen ( $A_0$ ) und der realen Kontaktfläche ( $A_r$ ) unterschieden werden. Für die tribologischen Erklärungen und Untersuchungen ist meist die reale Kontaktfläche von Bedeutung, da hier die tribologischen Interaktionen zwischen den beiden Oberflächen stattfinden.

Auf Grund der statistischen Verteilung der Rauheitsordinaten beider Oberflächen wird die zufällige Spaltweite  $h(x)$  an bestimmten Stellen  $x$  in Abhängigkeit der Normalkraft verschiedene Werte annehmen.

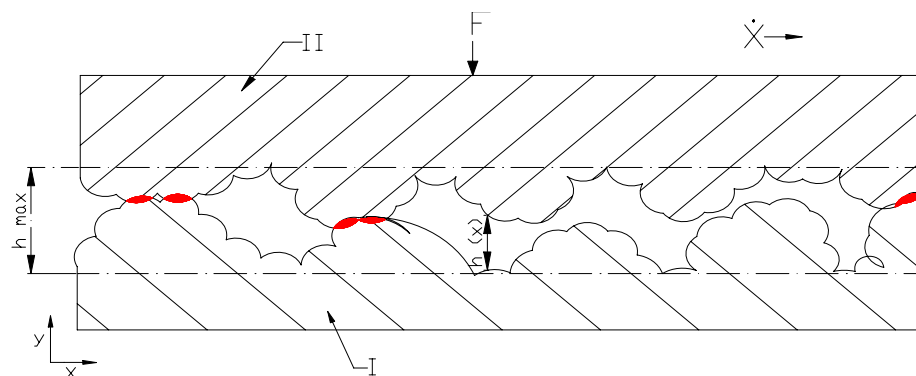


Abbildung 3.4: Kontakt zweier rauher Oberflächen

Die Ausbildung der realen Kontaktfläche  $A_r$  unter einer Kraft erfolgt als ein Ergebnis des Eindringens und des Verformens einzelner Mikroerhebungen. Je größer die Kraft, um so größer auch die Verformungen und damit die reale Kontaktfläche.

Nach [SON91] gilt:

$$\frac{A_r}{A_0} = 1 - \exp\left(-\beta \cdot \left(\frac{p}{E}\right)\right) \quad (3.2)$$

$p$  = Flächenpressung;  $\beta$  = Koeffizient, der von der Oberflächengüte abhängt.

Die Gleichung zeigt, dass:

- eine hundertprozentige reale Kontaktfläche nicht möglich ist,
- bei großen Kontaktflächen der Einfluss von E-Modul und Flächenpressung relativ gering ist.

Bowden und Tabor gehen im Gegensatz dazu von einer nahezu proportionalen Änderung der Berührungsfläche für alle Arten und Formen von Rauheit bei Metallflächen mit der Belastung aus [BOW59].

Happ gibt für die reale Kontaktfläche bei hochelastischen Stoffen 60 .. 90 % der nominellen (scheinbaren) Kontaktfläche an. Der Traganteil beträgt im elastischen Anteil bei rein metallischer Paarung weniger als 10% [HAP98].

### 3.1.2 Tribologie der Polymere

Der Einsatzbereich von Kunststoffen wird im Wesentlichen durch seine mechanischen, chemischen und thermischen Eigenschaften bestimmt. Dabei ändern sich die Eigenschaften von Polymeren, im Gegensatz zu Metallen, sehr stark mit der Temperatur und der Belastung. Die molekularen Wechselwirkungen beim Reibungskontakt werden hauptsächlich durch die physikalischen Adhäsionskräfte zwischen den kontaktierten Flächen beschrieben. Dies rührt daher, dass sich durch die Krafteinwirkung bzw. Temperaturerhöhung die Rauheitsspitzen des Polymeres auf Grund seines geringen Elastizitätsmoduls sehr schnell deformieren und abplatteln, so dass eine größere reale Kontaktfläche entsteht. Dieses viskoelastische Verhalten ist stark zeitabhängig. Bei einem langanhaltenden Kontakt unter Krafteinwirkung steigen die Adhäsionskräfte stark an. Diese Adhäsionskräfte beruhen auf:

- Ionenkräften
- Dipolwechselwirkungen
- Wasserstoffbrückenbindungen
- Dispersionskräften.

Die Reibkraft wird in eine Adhäsionskomponente und eine Deformationskomponente aufgeteilt. Beim Dominieren der Adhäsionskomponente kann die Reibungszahl mit der Adhäsionsarbeit der Gleitpartner verknüpft werden.

$$F = F_{Ad} + F_{Def} \quad (3.3)$$

Der Betrag der einzelnen Komponenten ist von den einzelnen Gleitflächen, der Oberflächentopologie, der Art der Bewegung, den Umfeldbedingungen und der Zeit abhängig. Dabei spielen die Größe der realen Kontaktflächen und die Scherfestigkeit der Rauheitsspitzen eine besondere Rolle. Belastung und Geschwindigkeit mit der daraus resultierender Reibungswärme beeinflussen die viskoelastische Deformation der Oberflächen [UET85].

Die Adhäsionskräfte entstehen durch atomare und molekulare Wechselwirkungen und Bindungen. Sie werden durch die Größe der Scherfestigkeit zum Trennen der Bindungen bestimmt und steigen proportional zu Größe der realen Kontaktfläche.

Der deformative Anteil der Reibkraft wird im Wesentlichen durch Verhaken und Abscheren von Rauheitsspitzen, dem Trennen von Schweiß- bzw. Kontaktbrücken und der Verformung von Rauheitsspitzen bzw. der Durchfurchung des weichen Materials geprägt.

### **Einfluss der Adhäsionsarbeit**

Erhardt entwickelte in [ERH80] eine empirische Gleichung zur Ermittlung der Gleitreibungszahl unter Zuhilfenahme der Adhäsionsarbeit.

$$W_{ab} = \gamma_a + \gamma_b - \gamma_{ab} \quad (3.4)$$

$\gamma_a, \gamma_b$  : Oberflächenenergien der einzelnen Gleitpartner

$\gamma_{ab}$  : Grenzflächenenergie der Gleitpaarung

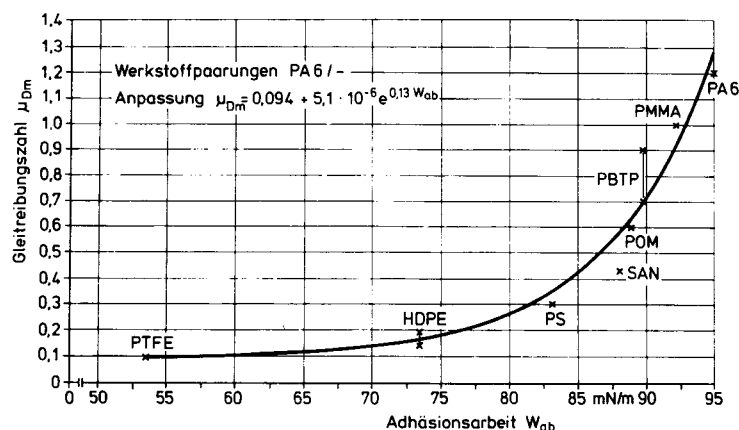


Abbildung 3.5: Gleitreibungszahl als Funktion der Adhäsionsarbeit an PA6 mit verschiedenen Gleitpartnern nach [ERH80]

Die Untersuchungen wurden an einer Vielzahl von polymeren Materialpaarungen bei einer Gleitgeschwindigkeit von 0,12 m/s und einer Flächenpressung von 0,09 N/mm<sup>2</sup> auf einer Ring/Ring-Apparatur durchgeführt. Die Messergebnisse (Abbildung 3.5 beispielhaft für PA6 mit unterschiedlichen Gegenmaterialien) lassen sich mit folgender Exponentialfunktion beschreiben:

$$\mu = A_0 + A_1 \cdot e^{A_z \cdot W_{ab}} \quad (3.5)$$

Diese Reibwertbestimmung durch Erhard stellt nur eine überschlägige Abschätzung der zu erwartenden Werte dar, da die Abhängigkeit von der Belastung, der Gleitgeschwindigkeit und der Oberflächenrauheit nicht ermittelt wurde.

### Oberflächenrauheit

Hinsichtlich der Abhängigkeit der Reibungszahl von der Oberflächenrauheit muss zwischen überwiegend elastischen und weniger elastischen Werkstoffen unterschieden werden. Der Reibwert ergibt sich aus der Summe der adhäsiven und deformativen Komponente, wobei sich die Abhängigkeiten dieser Anteile mit der Rauheit und den Werkstoffen ändern.

Für überwiegend elastische Werkstoffe wächst die deformativ bedingte Komponente mit zunehmender Rauheit nur unbedeutend, für weniger elastische Werkstoffe progressiv. Die adhäsive Komponente nimmt sowohl bei elastischen wie auch weniger elastischen Werkstoffen ab.

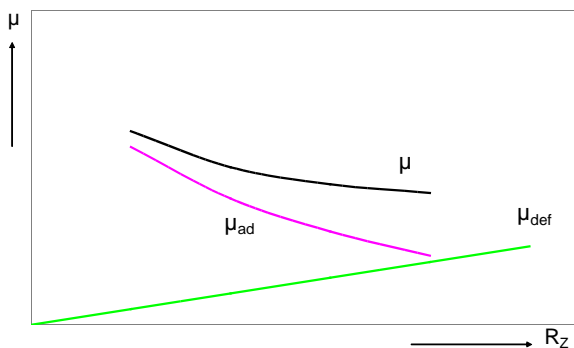


Abbildung 3.6: elastischer Werkstoff [POL82]

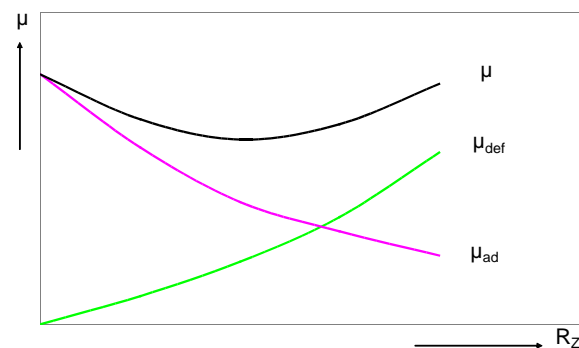


Abbildung 3.7: weniger elastischer Werkstoff [POL82]

Die Abbildung 3.6 und 3.7 geben die prinzipiell möglichen Abhängigkeiten des Reibwertes von der Oberflächenrauheit bei sehr elastischen und weniger elastischen Werkstoffen an. Die Lage und die Ausprägung des Reibwertminimums ist von der Elastizität der Werkstoffe abhängig [POL82].

Die optimale Rauheit der einzelnen Kunststoffe ist unterschiedlich. Sie ist im Wesentlichen für die Höhe des Verschleißes und die sich einstellende Reibungszahl verantwortlich. Durch Modifi-

zierung der Kunststoffe, z. B. durch Zugabe von Gleitmitteln oder anderen Zusatzstoffen kann sich diese optimale Rauheit ändern beziehungsweise anders einstellen.

Bei Kunststoff-Kunststoff-Paarungen ist die Rauheit von untergeordneter Bedeutung, bei Kunststoff-Metall-Paarungen dagegen funktionsentscheidend. Unabhängig vom Kunststoffpartner sollte die Oberfläche des metallischen Gleitpartners eine Rockwellhärte von mindestens HRC 50 aufweisen, um zu verhindern, dass metallische Rauheitsspitzen abbrechen und sich in die Oberfläche des Kunststoffes einlagern. Dies würde zu einem erhöhten Verschleiß in der tribologischen Paarung führen.[UET85]

Dabei muss aber beachtet werden, dass der meist härtere Gegenpartner (z. B. Metall) seine Rauheitsspitzen in das weichere Polymer eindringen lässt und bei einer Relativbewegung eine Wulst vor sich herschiebt bzw. eine Furchung auftritt.

### Flächenpressung

Nach Kragelski und Polzer ist in der Abbildung 3.8 ist der Verlauf der Reibungszahl in abhängigkeit von der Normalkraft dargestellt. Der Gesamtreibwert lässt sich in zwei Bereiche unterteilen. Der so genannte Coulomb-Bereich zeichnet sich durch hohe Reibkraftänderung bei geringer Normalkraftänderung aus und wird hauptsächlich durch den adhäsiven Anteil des Reibwertes geprägt. Im so genannten Amontons-Bereich ist das Minimum des Reibwertes überschritten und ändert sich nur noch geringfügig mit steigender Normalkraft. Der Hauptteil des Reibwertes in diesem Bereich ist vom deformativen Anteil getragen.

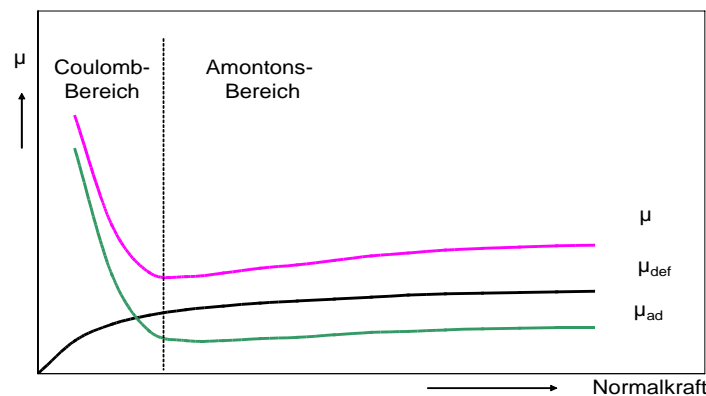


Abbildung 3.8: Prinzipielle Abhängigkeit der Reibungszahl von der Normalkraft [KRA82, POL82]

Die quantitativen Auswirkungen dieser einzelnen Komponenten sind wiederum von den Eigenschaften des Tribosystems abhängig und beeinflussen sich gegenseitig [KRA82, POL82].

Bedingt durch die komplexe Wirkung der einzelnen Faktoren ist gegenwärtig keine exakte mathematische Darstellung der Zusammenhänge möglich bzw. nutzbar, so dass unter konkreten Bedingungen auf eine experimentelle Ermittlung der Reibwerte zurückgegriffen werden muss.

### Geschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit

Der Reibwert ändert sich entscheidend bei einer Änderung der Geschwindigkeit. In [KRA82] geht Kragelski davon aus, dass:

1. bei zunehmender Geschwindigkeit der Reibwert ein Maximum durchläuft, und
2. bei zunehmendem Druck verschiebt sich das Maximum zu niedrigeren Geschwindigkeiten.

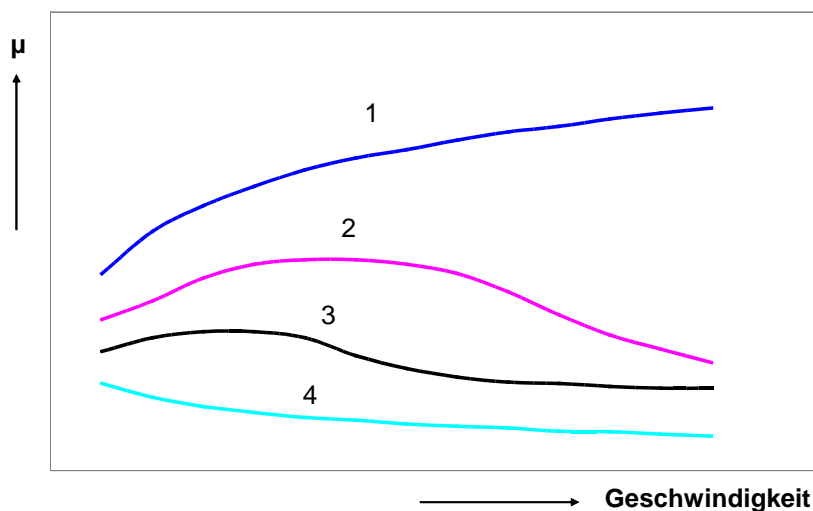


Abbildung 3.9: Abhängigkeit des Reibwertes von der Flächenpressung [KRA82]

In Abbildung 3.9 ist die prinzipielle Abhängigkeit des Reibwertes von der Gleitgeschwindigkeit bei unterschiedlichem Anpressdruck (1 niedriger Anpressdruck, 2, 3 mittlerer Anpressdruck, 4 hoher Anpressdruck) dargestellt.

Dabei wurde unter Berücksichtigung von Versuchen und theoretischen Erkenntnissen folgende Formel für die Reibkraft  $T$  vorgeschlagen:

$$T = (a + b \cdot v) \cdot e^{-c \cdot v} + d \quad (3.6)$$

Dabei sind  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  Variablen und  $v$  die Geschwindigkeit. Durch Variation der Faktoren ergeben sich die in Abbildung 3.9 dargestellten Kurven. Eine konkrete Aussage für verschiedene Paarungen ist jedoch nicht möglich, da Werte für die Parameter nicht vorhanden sind und diese für einen konkreten Anwendungsfall bestimmt werden müssen [KRA82].

Die Ausprägung und Lage eines Maximalwertes der Reibung von Polymeren, in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit, wird von der Temperatur bestimmt [UET85].



## 3.2 Verschleiß

Verschleiß ist nach DIN 50320 der „fortlaufende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers.“

Beim Verschleiß laufen physikalische und chemische Prozesse ab, die verschiedene Verschleißmechanismen hervorrufen. Diese Verschleißmechanismen lassen sich in folgende Gruppen einteilen und sind durch folgende Auswirkungen gekennzeichnet:

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| • Abrasion:                  | Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen             |
| • Oberflächenzerrüttung:     | Risse, Grübchen                             |
| • Tribochemische Reaktionen: | Reaktionsprodukte                           |
| • Adhäsion:                  | Fressen, Materialübertrag, Schuppen, Löcher |

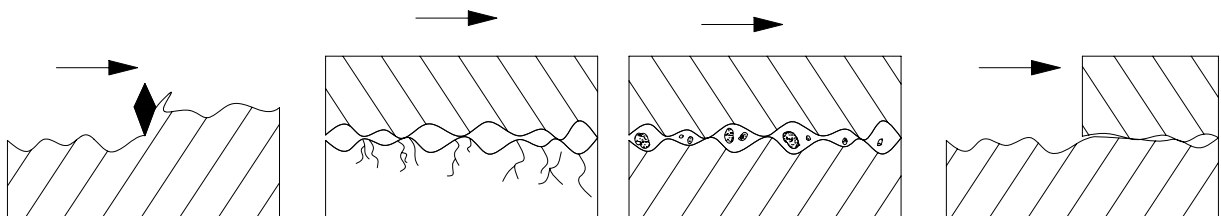


Abbildung 3.10 Verschleißmechanismen: Abrasion, Oberflächenzerrüttung, tribochemische Reaktion, Adhäsion

Die einzelnen Mechanismen treten teilweise gemeinsam auf und beeinflussen sich dann meist gegenseitig.

Der Verschleiß lässt sich in die Arten Gleitverschleiß, Rollverschleiß, Bohrverschleiß und Wälzverschleiß, je nach Beanspruchungsart der Paarung, unterteilen. Dabei können die Zustände Abtragverschleiß, Auftragverschleiß, Formänderungverschleiß, Stoffänderungverschleiß an den beteiligten Oberflächen beobachtet werden. Wesentliche Einflussgrößen auf den Verschleiß sind:

- die Grundkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche),
- der Zwischenstoff (Art, Teilchengröße u.a.);
- der Gegenkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche),
- die Belastung (Größe, zeitlicher Verlauf),
- die Art der Bewegung (Gleiten, Rollen, Stoßen),
- die umgebende Atmosphäre (z. B. Luft, Schutzgas, Vakuum),
- und die Temperatur (Höhe, zeitlicher Verlauf).

Verschleiß ist immer eine Systemeigenschaft in Verbindung mit dem einwirkenden Beanspruchungskollektiv, nicht nur eine Eigenschaft der beteiligten Komponenten.

Das auf das Tribosystem Zahnriemen-Stützschiene einwirkende Beanspruchungskollektiv ist die Ursache des Verschleißes von Zahnriemen sowie Gleitschiene, die sich in Form von Stoff- und Eigenschaftsänderung, Formänderung und in Form von Verschleißpartikeln äußert.

#### **Mess- und Beschreibungsgrößen des Verschleißes**

Zur Vergleichbarkeit des Verschleißes unter verschiedenen Bedingungen werden normierte Verschleiß-Messgrößen verwendet. Diese orientieren sich direkt an der Form- oder Masseänderung des zu untersuchenden Körpers.

Der Verschleißbetrag  $W$  kann in vier Arten unterschieden werden:

- linearer Verschleißbetrag: Längenänderung senkrecht zur verschleißenden Fläche,
- planimetrischer Verschleißbetrag: Größe der Schnittfläche, die senkrecht zur verschleißenden Fläche abgetragen wird,
- volumetrischer Verschleißbetrag: Volumenänderung des verschleißenden Körpers,
- massenmäßiger Verschleißbetrag: Masseänderung des verschleißenden Körpers.

Der Verschleißbetrag wird einer geeigneten Bezugsgröße zugeordnet. Diese Bezugsgrößen können z. B. der Beanspruchungsweg oder die Beanspruchungsdauer sein.

Da der Verschleiß keine Materialkenngröße ist, muss er immer im Zusammenhang mit dem gesamten Tribosystem gesehen werden. Eine Angabe zur Beanspruchung und eine Beschreibung des Tribosystems sind daher bei der Angabe des Verschleißes für einen sinnvollen Vergleich notwendig.

Die beste Funktionserfüllung hinsichtlich des Verschleißes liegt bei tribologischen Paarungen dann vor, wenn die Änderung der Kontaktgeometrie und damit der Verschleißintensität infolge der Beanspruchung ein Minimum erreichen. Dieser Zustand ist meist mit dem Ende der Einlaufphase erreicht und durch die entstehende Betriebsrauheit charakterisiert. In der Einlaufphase erfolgt eine erste geometrische Anpassung beider Körper. Die Abhängigkeit des Verschleißes von der Oberflächenrauheit ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Bei sehr geringen Rauheiten kommt es zu einer starken Annäherung der Oberflächen mit überwiegend adhäsiven Verschleiß. Nimmt die Oberflächenrauheit zu, durchläuft die Verschleißintensität ein Minimum, um bei hoher Rauheit mit einem erhöhten Anteil von plastischen Deformation und Abrasion wieder hohe Verschleißwerte zu erreichen. Die Lage des Minimums ist abhängig von den Materialien und den Betriebsparametern [BRE86].

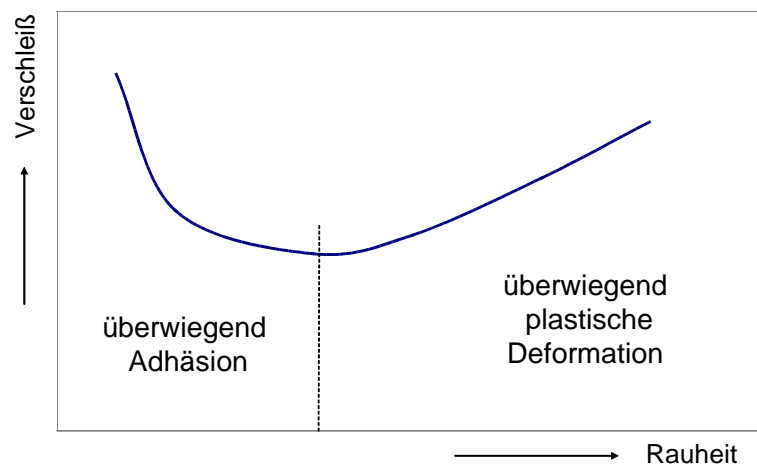


Abbildung 3.11 Verschleiß in Abhängigkeit von der Rauheit [BRE86]

Je nach Art des Kunststoffes kann sowohl die Verschleißmenge als auch die Reibungszahl in weiten Grenzen variieren. Niedrige Verschleißraten mit hohen Reibwerten beim Polyethylen und Polyimid im tribologischen System mit Stahl stehen niedrige Reibwerte bei hohen Verschleißraten in Verbindung mit PTFE gegenüber. Gezielt eingesetztes Füll- bzw. Verstärkungsmaterial können sowohl die Verschleißintensitäten als auch die Reibungszahlen beeinflussen [GAH90].

## 3.3 Thermisches Verhalten

### 3.3.1 Allgemeines

Durch Reibung wird die mechanische Beanspruchung in den oberflächennahen Bereichen der Kontaktzonen in Wärme gewandelt. Dies hat die Ausbildung von Oberflächentemperaturgradienten zur Folge, die sowohl die Eigenschaftsänderungen der Festkörper bewirken als auch die physikalischen und chemischen Grenzflächenprozesse beeinflussen. Die lokalen Kontakttemperaturen resultieren aus den Temperaturen der Festkörper und der reibbedingten Temperaturerhöhung. Diese Kontakttemperaturen sind im wesentlichen abhängig von der Reibungskraft, der Gleitgeschwindigkeit und den Wärmeeigenschaften der Gleitpartner. Sie erreicht im idealen Prozess nach einer entsprechenden Zeit einen Endwert und bleibt dann konstant (stationärer Zustand).

Eine sich kurzzeitig einstellende Temperaturerhöhung durch Scherung oder Plastifizierung von Mikroerhebungen nennt man Blitztemperatur. Diese örtliche Temperaturen können bei metallischen Paarungen bis 1000°C betragen und  $10^{-6}$  s andauern. Dieser Temperatursprung wird u. a. bestimmt durch die Gleitgeschwindigkeit, Abmessungen der Kontaktfläche, maximale Schubspannungen und Wärmeeigenschaften des Materials [KAF73].

Die starke Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe von Temperatur sowie die relativ niedrige Wärmeleitfähigkeit kann bei Überbeanspruchung schnell zum thermischen Versagen der Gleitpaarung führen [UET85].

Bei Wärmeübertragungsvorgängen kann zwischen stationären d. h. zeitlich unveränderlichen und instationären d. h. zeitlich veränderlichen Vorgängen unterschieden werden. Ist das System nach einer ausreichend langen Zeit thermisch stabil und die Wärmezufuhr konstant, ist ebenfalls der Wärmestrom konstant und die Temperatur ist unabhängig von der Zeit [WAG93, POL05].

### 3.3.2 Instationäre Wärmeleitung

Zeitabhängige oder instationäre Temperaturfelder treten auf, wenn sich die thermischen Bedingungen an der Berandung eines Körpers ändern. Dies tritt z. B. ein, wenn ein Körper mit einer konstanten Temperatur abgekühlt bzw. erwärmt wird. Ein Wärmestrom fließt über die Körperoberfläche und die Temperatur im Körper ändert sich mit der Zeit. Am Ende dieses zeitabhängigen Vorgangs stellt sich eine neue stationäre Temperaturverteilung im Körper ein [BAE06].

Die Fouriersche Differentialgleichung:

$$\frac{\delta t}{\delta \tau} = a \left( \frac{\delta^2 t}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 t}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 t}{\delta z^2} \right) + \frac{q_E}{\lambda c_p} \quad (3.7)$$

der nichtstationären Wärmeleitung beschreibt die Abhängigkeit der Temperatur von Ort und Zeit in einem ruhenden, homogenen und isotropen Medium und kontinuierlichem Wärmeeintrag [FRO85]. Die Lösung dieser Gleichung kann auf drei Wegen erfolgen:

- durch geschlossene Lösung bei bekannten Randbedingungen und der Annahme der Temperaturunabhängigkeit der Stoffkennwerte, (Carslaw)
- durch eine numerische Lösung der Differentialgleichung, bei bekannten Randbedingungen (Temperaturabhängigkeit der Stoffkennwerte möglich), Methode der finiten Elemente,
- durch experimentelle Analogieverfahren, bei der z. B. Vorgänge aus der Elektrizitätsleitung auf Wärmeleitungsvorgänge übertragen werden.

Alle drei Methoden führen nur bei relativ einfachen Geometrien und Kenntnis der Randbedingungen zu einer brauchbaren Lösung.

Der Temperaturverlauf in einem unendlichen homogenen und isotropen Körper stellt sich folgendermaßen im räumlichen und zeitlichen Verlauf dar:

$$\Delta T(r, t) = \frac{\dot{Q} \cdot r}{2 \cdot \lambda \cdot f} \cdot \left( e^{\frac{-r^2}{4 \cdot a \cdot t}} \cdot \left( \frac{\sqrt{4 \cdot a \cdot t}}{r} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{r}{\sqrt{4 \cdot a \cdot t}} \right) \right) \quad (3.8)$$

Die Gleichung ist eine Lösung der Fourier-Gleichung (3.7) mit kontinuierlicher Wärmequelle im Punkt  $r = 0$  [GRI90, HER00]. Die Lösung gilt auch annähernd für endliche Medien, wenn  $t$  und  $r$  ausreichend klein gewählt werden.

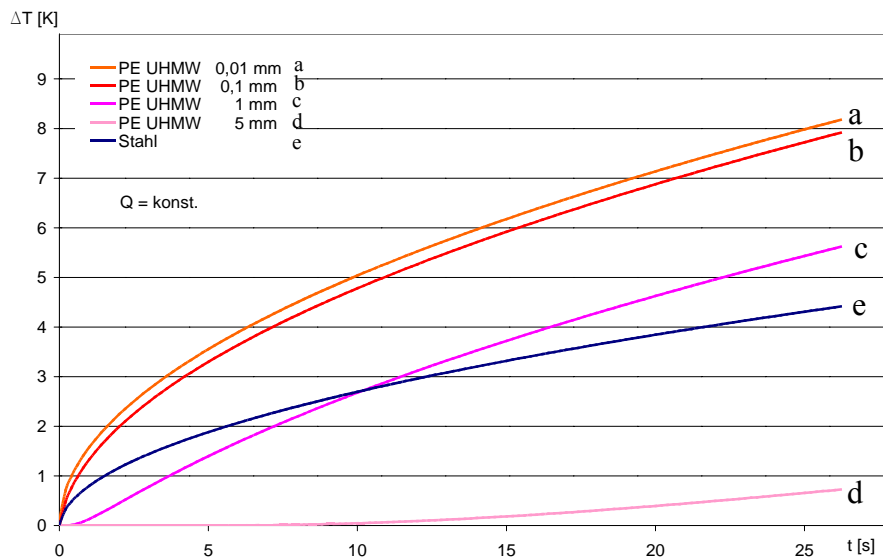


Abbildung 3.12: Temperaturverläufe in unterschiedlicher Tiefe und Materialeigenschaft

Stellt man den Temperaturverlauf nach Gleichung (3.8) in der Nähe der Oberfläche und deren zeitlicher Verlauf in grafischer Form dar, ergeben sich die Diagramme nach Abbildung 3.12 und 3.13. Für eine konkrete Darstellung wurden als Materialien PE-UHMW ( $\lambda = 0,42 \text{ W/(mK)}$ ,  $a = 2,38 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ) und Stahl ( $\lambda = 15,1 \text{ W/(mK)}$ ,  $a = 3,91 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) ausgewählt.

In Abbildung 3.12 ist der Temperaturverlauf über eine Zeitdauer von 25 Sekunden für unterschiedliche Schichttiefen von der Oberfläche dargestellt. Die Temperaturen für Stahl in der Tiefe von 0,01 mm bis 10 mm liegen annähernd auf einer Kurve und wurden deshalb im Diagramm so sichtbar. Es findet eine sehr schnelle Weiterleitung der Wärme auch in größere Entfernungen von der Oberfläche statt. Ein unverkennbar anderer Verlauf ergibt sich für die Temperaturentwicklung in PE-UHMW. Unmittelbar im Oberflächenbereich gelegene Punkte (0,01 mm) reagieren mit dem Anlegen einer Wärmequelle mit einem deutlichen Temperaturanstieg, der sich mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche deutlich abschwächt. Bei einer Tiefe von 5 mm ist eine erste Reaktion erst nach 10 Sekunden mit sehr geringen Temperaturänderungen zu erkennen.

Auffällig hierbei ist, dass bei einer Änderung der Oberflächentemperatur die Temperaturänderung bei Stahl fast unabhängig von der Materialtiefe sehr schnell erfolgt. Bei PE-UHMW ist ein sehr viel stärkerer Anstieg der Temperatur im Oberflächenbereich zu erkennen, welcher mit zunehmender Tiefe stark abnimmt.

Berechnet man die Temperaturdifferenzen nach einer bestimmten Zeit für bestimmte Tiefen bei unterschiedlichen Materialien, ergibt sich die Darstellung nach Abbildung 3.13. Die Temperaturänderung an der Oberfläche (Kontaktfläche  $s = 0$ ) erreicht nach 25 Sekunden bei PE-UHMW einen sehr viel höheren Wert als bei Stahl. Die Temperaturänderung in der Tiefe erfolgt jedoch sehr viel langsamer. Diese Erkenntnisse entsprechen den Ergebnissen von Baehr und Stephan [BAE06].

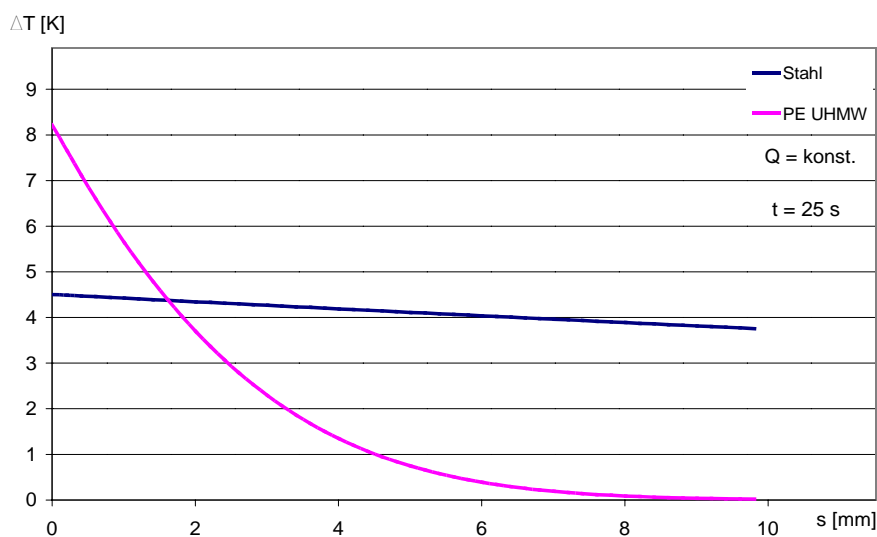


Abbildung 3.13: Temperaturverlauf von PE-UHMW und Stahl in Abhängigkeit von der Materialtiefe

Die Temperaturverläufe aus den Abbildungen 3.12 und 3.13 zeigen auf, dass sich die Oberflächentemperatur von verschiedenen Materialien (hier PE-UHMW und Stahl) sehr unterschiedlich bei Einwirkung von einer Wärmequelle ändern. Sind die Temperatur- und die Wärmeleitfähigkeit gering, so ändert sich die Kontakttemperatur sehr stark. Ein Temperatenausgleich mit tiefer liegenden Schichten verläuft relativ langsam. Sind Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit hoch, so verläuft das Temperaturprofil sehr viel flacher bei gleichzeitig schnellerer Weiterleitung in tiefere Bereiche.

Aus den Abbildungen 3.12 und 3.13 lässt sich ableiten, dass die Kontakttemperaturen deshalb bei Kunststoffen deutlich über den mittleren Temperaturen der Bauteile liegen und eine thermische Auslegung nach der Kontaktflächentemperatur, welche meist in der Wirkpaarung liegt, anzustreben ist.

Die analytische Lösung der Differentialgleichung gelingt nur in den einfachsten Fällen [FRO85], das komplexe System Zahnriemen – Stützschiene ist damit nicht darstellbar.

Für eine zeitliche Abschätzung der Erwärmung an elektrischen Maschinen wird die Gleichung:

$$\Delta T(t) = \Delta T(\infty) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3.9)$$

verwendet. Die thermische Zeitkonstante  $\tau$

$$\tau = \frac{c}{(\alpha \cdot A)} \quad (3.10)$$

und die maximale Temperaturerhöhung

$$\Delta T(\infty) = \frac{P_v}{(\alpha \cdot A)} \quad (3.11)$$

werden jedoch für die entsprechenden Anlagen meist experimentell ermittelt, da in den Maschinen meist mehrere Wärmequellen vorhanden sind und die Wärmewiderstände im Inneren und an der Oberfläche unterschiedlich sind. Der reale Temperaturanstieg erfolgt nicht mit einer reinen e-Funktion, da sich durch die gegenseitige Beeinflussung einzelner Anlagenteile die genauen Vorgänge wesentlich komplizierter darstellen. [FIS95, GOT54]

Für die Erwärmung von technischen Gebilden geben die Gleichungen 3.8 und 3.9 bei bekannten Parametern einen guten Ansatz für Ermittlung der zu erwartenden Temperatur. Stehen die entsprechenden Parameter nicht zur Verfügung bzw. werden genaue Temperaturwerte benötigt, ist eine experimentelle Ermittlung des Erwärmungsverhaltens unter den tatsächlichen geometrischen und technologischen Bedingungen notwendig.

### 3.3.3 Stationäre Wärmeleitung

Wird der Wärmetransport dauerhaft durch die Zufuhr von Wärme aufrecht erhalten und es tritt keine zeitliche Änderung der Vorgänge auf, so spricht man von stationärer Wärmeleitung. Der eintretende Wärmestrom wird vollständig durch den Körper geleitet und an der kalten Seite wieder abgegeben. Wärme wird dann nicht von den Körpern gespeichert.

Beispiel für eine eindimensionale, stationäre Wärmeleitung für 2 Schichten und einer Wärmequelle nach Abbildung 3.14 gilt [WAG93]:

$$\dot{Q} = \frac{[\Delta T \cdot A]}{\left( \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha} \right)} \quad (3.12)$$

Bei diesem Modell muss von bestimmten Randbedingungen ausgegangen werden:

- Wärmestrom erfolgt nur in Normalenrichtung zur Kontaktfläche,
- konstanter Wärmestrom über die gesamte Zeit,

- stationärer Gleichgewichtszustand der Temperaturverteilung,
- gleiche Temperatur über der jeweiligen Oberfläche,
- gleiche Strömungsverhältnisse und -bedingungen an der Oberfläche,
- jeweils konstante  $\lambda$ - und  $\alpha$ -Werte.

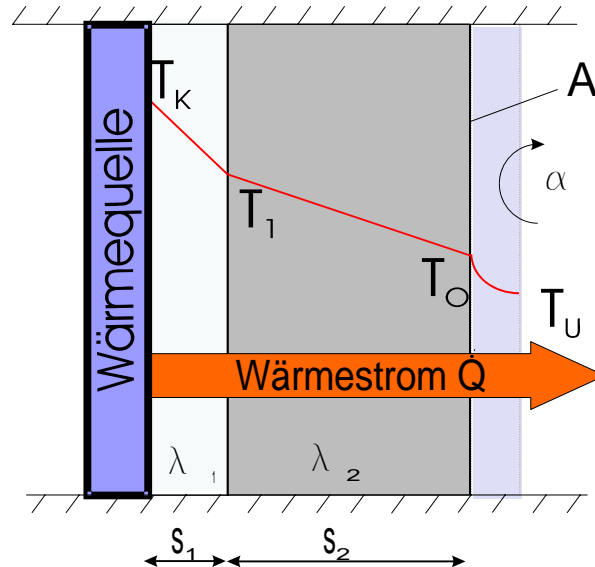


Abbildung 3.14 Temperaturverlauf beim Wärmedurchgang durch eine mehrschichtige Wand

In Abbildung 3.14 ist der eindimensionale, stationäre Wärmedurchgang am Beispiel einer zweischichtigen Wand mit Wärmeübergang an der Oberfläche dargestellt. Bei konstanten Wärmestrom sind die Kontakttemperatur zur Wärmequelle, die Temperaturen im Inneren des Körpers und die Oberflächentemperatur über die Zeit unveränderlich.

Eine Vielzahl von Berechnungsverfahren folgen dem Prinzip der Wärmebilanzberechnungen. Mehrere Autoren verfolgen diesen Ansatz auf ihre Problemstellung bezogen.

Die Berechnung der mittleren Lagertemperatur und der Gleitflächentemperatur an Radialgleitlagern, bestehend aus Stahlwelle und Kunststofflagerschale, durch Erhard und Strickle [ERH85], legt die Wärmebilanz zu Grunde. Sie entwickelten eine empirische Gleichung für bestimmte Bewegungsformen und konstruktive Gegebenheiten aus Laborversuchen. Für diese Gleichung werden verschiedene Korrekturfaktoren für Werkstoff, Gleitreibungszahl, Bewegungsform und Schwenkwinkel, Rauheit und Richtung der Bearbeitungsriefen angegeben. Diese gelten für den Wellendurchmesserbereich von 20 mm bis 60 mm. Die Lösung stellt nach Angabe der Verfasser jedoch nur eine Näherungslösung dar.

Rieger untersucht die Temperaturen von über Schmirgelpapier gleitenden Gummiprüfproben und leitet die Temperaturgleichung für bewegte und stationäre Wärmequellen her. Fehlende Werte für Temperaturleitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit wurden so gewählt, dass sich eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten ergab. Der berechnete



Temperaturanstieg erfolgt demnach proportional zur Quadratwurzel aus der Gleitgeschwindigkeit [RIE88].

Song untersuchte die Reibung und den Verschleiß in eigenverstärkten Polymerwerkstoffen. Dabei stellte er einen weitgehend linearen Einfluss von Reibgeschwindigkeit und Flächenpressung auf die Temperaturerhöhung fest. Die Art der Wärmeerzeugung, durch Variation der Geschwindigkeit oder der Pressung, hatte keinen deutlichen Einfluss auf die Erhöhung der Gleitflächentemperatur [SON91].

Bartel [BAR00] geht von der Lösung der Laplace-Transformation durch Carslaw und Jaeger aus und entwickelt eine Näherungslösung der Kontakttemperatur bei quadratischer Kontaktfläche für Metall - Metall- Paarungen.

Eine umfassende Recherche zu Veröffentlichungen zur Bestimmung der Grenzflächentemperatur bei tribologischen Vorgängen haben Kaffanke und Czichos in [KAF73 ] zusammengestellt. Insbesondere wird auf Messmethoden, theoretische und experimentelle Untersuchungen eingegangen. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse wird nicht durchgeführt.

Die Analyse der Wärmebilanz und die Untersuchungen bei ähnlichen Problemstellungen zeigen, dass die Berechnung der Kontakttemperatur durch analytische Verfahren nur für einfache Problemstellungen zu einer befriedigenden Aussage führen. Die Entwicklung einer empirischen Berechnungsmethode durch die Auswertung von entsprechenden Untersuchungen stellt oftmals eine brauchbare Lösung für entsprechende Probleme dar.



## 4 Analyse der Beanspruchung

### 4.1 Tribologie der Wirkpaarung

Bei unbeschichteten Polyurethanzahnriemen weist die Zahnkopffläche nur sehr geringe Rauheit auf. Dadurch ergibt sich mit dem Gegenkörper eine relativ große reale Kontaktfläche (Abbildung 4.1). Dieser Effekt wird durch die plastische Deformation, auf Grund der geringen Härte des Polyurethan-Elastomers (Shorehärte 43° D), indem sich Erhebungen an der Zahnkopffläche am Gegenkörper abplatteten, verstärkt. Insgesamt steigt deshalb der Anteil an adhäsiver Reibung an.

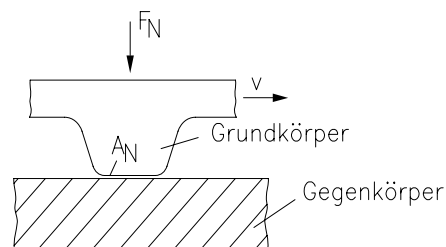


Abbildung 4.1: PU-Zahnriemenkopf

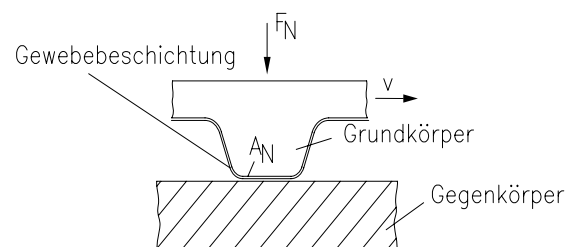


Abbildung 4.2: PA beschichteter Zahnriemenkopf

Im Gegensatz dazu ist die reale Kontaktfläche bei mit Polyamidgewebe beschichteten Zahnriemen durch die Oberflächenstruktur des Gewebes auf kleine, gleichmäßig verteilte Bereiche beschränkt. Durch die aufgebrachte Normalkraft wird das Gewebe deformiert und die reale Kontaktfläche dadurch insgesamt erhöht, es bilden sich jedoch durch die Gewebestruktur, bestehend aus Fäden mit Einzelfasern, keine größeren geschlossenen Flächen (Abbildung 4.2). Es ist zu erwarten, dass der adhäsive Anteil der Reibung bei beschichteten Zahnriemen geringer und damit der Reibwert insgesamt niedriger als bei unbeschichteten Polyurethanzahnriemen ausfällt.

Die reale Kontaktfläche ändert sich mit steigender Masse auf Grund der Verformung der Zahnriemenköpfe durch Vergrößerung der Zahnkopffläche als auch durch eine Annäherung der Oberflächen.

## 4.2 Verschleiß am System Zahnriemen-Gleitabstützung

Führungsschiene und Zahnriemen verschleßen während ihres Einsatzes durch ein entsprechendes Beanspruchungskollektiv. Dabei unterscheiden sich die Verschleißerscheinungen bei polyamidbeschichteten Zahnriemen wesentlich von den unbeschichteter Zahnriemen. Deshalb wird hier eine Unterteilung vorgenommen.

### Unbeschichteter Zahnriemen:

In diesem tribologischen System tritt hauptsächlich Abtragverschleiß auf. Als Verschleißkriterium kann deshalb bei unbeschichteten PU-Zahnriemen die Abnahme der Zahnkopfhöhe dienen. In Abbildung 4.3 ist der Verschleiß am PU- Zahnriemen dargestellt.

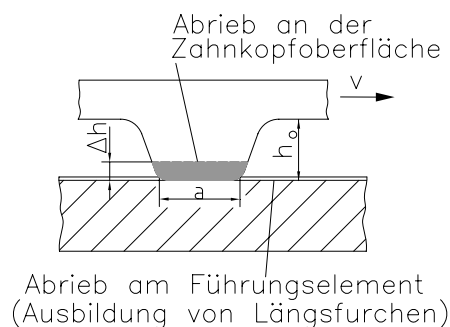


Abbildung 4.3: Verschleiß am System

$$h_i = h_0 - \Delta h \quad (4.1)$$

Dabei erhöht sich mit zunehmendem  $\Delta h$  die Zahnkopfbreite  $a$  und damit die nominelle Kontaktfläche  $A_n$

$$A_n = i \cdot (a(h_i \cdot b)) \quad (4.2)$$

Da der Volumenstrom des Verschleißabtrages linear ist, sich aber die Kontaktfläche mit voranschreitendem Verschleiß erhöht, ist mit einer geringeren Abnahme von  $h_i$  bei fortschreitenden Zahnhöhenverlust zu rechnen.

Ist eine minimale Zahnhöhe  $h_i$  (Grenzzahnhöhe) erreicht, ist davon auszugehen, dass ein sicherer Transport wegen des Überspringens des Zahnriemens an den Zahnscheiben nicht mehr gewährleistet ist. Der Materialverlust am Führungselement und am Zahnriemen führt zu einer Absenkung der Förderhöhe. Bei bestimmten Zuführprozessen bzw. Handlingsoperationen kann dies zu einer Fehlfunktion führen.

### **Beschichtete Zahnriemen:**

Bei beschichteten Zahnriemen können nicht die Verschleißkriterien von unbeschichteten Zahnriemen angewendet werden. Auf Grund der geringen Dicke der aufgetragenen Gewebeschicht ist eine Beschreibung über die Zahnhöhe nicht möglich, da nicht die Zahnhöhe insgesamt, sondern nur der Verschleiß der reibwertsenkenden Polyamidgewebeschicht von Interesse ist. Ist das Gewebe geschädigt bzw. vollständig abgetragen, kommt es zum Kontakt zwischen Polyurethan des Riemengrundkörpers und der Gleitschiene. Die zu erwartenden Reibwerte und Verschleißraten entsprechen dann die der unbeschichteten Zahnriemen.

Damit müssen neue Verschleißkriterien für PA-beschichtete Zahnriemen definiert werden:

- Zerstörung des Polyamidgewebes und damit Abtrag der z. T. mit PU-Matrixmaterial getränkten Fäden bzw. Fasern,
- Reibwerterhöhung durch zunehmende Zerstörung der Gewebeschicht und damit sich ständig vergrößernde Kontaktfläche des PU-Materials mit der Stützschiene,
- Verschleiß der Führungsschiene in Form von Riefen, Spuren, Furchung und Dickenreduzierung der Stützschiene Materialien,
- Materialübertrag auf Gleitflächen.

Der Verschleiß an Zahnriemen – Stützschiene-Kombinationen ist deshalb in dieser Arbeit weiter zu fassen als der Materialverlust der beteiligten Gleitpartner. Er bezieht sich insgesamt auf nachteilige Veränderungen des tribologischen Systems.

## **4.3 Thermische Beanspruchung der Wirkpaarung - Wärmebilanz**

Die Erhöhung der Gleitflächentemperatur resultiert aus der Umwandlung von Reibungsenergie infolge der Relativbewegung von Zahnriemen und Stützschiene in der Wirkstelle. Die erzeugte Wärme wird allseitig unsymmetrisch in die Umgebungsstruktur abgeführt. In alle Richtungen gibt es auf Grund von Konstruktion und Material unterschiedlich starke Temperaturverteilungen und Wärmeströme.

Eine Angabe von Temperaturen bezieht sich somit immer auf eine konkret ausgeführte Konstruktion. Für die Reibungs- und Verschleißvorgänge ist die Temperatur der Funktionselemente in der Kontaktebene maßgebend. Die Einsatzgrenzen werden maßgeblich von den in der Konstruktion beteiligten Kunststoffen beeinflusst, die nur eine niedrige Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig niedrigen Grenztemperaturen und großen Schwankungen der physikalischen Eigenschaften besitzen.

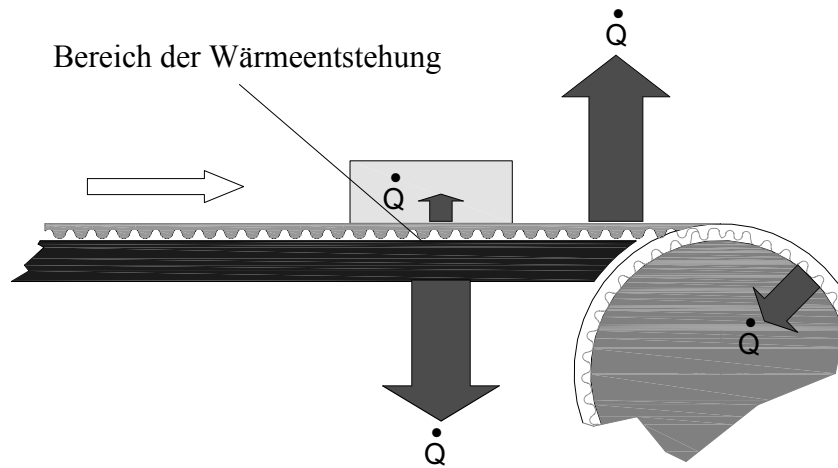


Abbildung 4.4: Wärmeströmung, über verschiedene Wege abgeführt

Die Grundlage der Temperaturberechnung ist die Bilanz der am Prozess beteiligten Wärmemengen. Ist noch kein stationärer Zustand erreicht, ist die Summe aus gespeicherter und abgegebener Wärmemenge gleich der zugeführten Wärmemenge:

$$Q_{zug} = Q_{gesp} + Q_{abgef} \quad (4.3)$$

Wird ein stationärer Zustand erreicht, so ist die zugeführte Wärmemenge gleich der abgeführten Wärmemenge und es tritt keine weitere Erwärmung auf. Dies gilt meist, wenn die Einrichtung nach genügend langer Zeit betrachtet wird. Es gilt dann:

$$Q_{zug} = Q_{abgef} \quad (4.4)$$

Bei der Untersuchung der Wärmebilanz der Reibpaarung wird von einer stationären Wärmeleitung durch die beteiligten Gleitpartner und dem Übergang der Wärme an die Umgebung ausgegangen. Für den allgemein gültigen Ansatz sollen für die Reibpartner endliche Körper angenommen werden.

Im Gleichgewichtszustand (stationärer Zustand) entspricht die zugeführte Reibleistung dem abgeführten Wärmestrom.

$$\dot{Q} = P_R \quad (4.5)$$

$$P_R = F_N \cdot \mu \cdot v \quad (4.6)$$

$$P_R = p_N \cdot A \cdot \mu \cdot v \quad (4.7)$$

Der abgeführte Wärmestrom teilt sich in Wärmeleitung  $\dot{Q}_L$ , Wärmekonvektion  $\dot{Q}_K$  und Wärmestrahlung  $\dot{Q}_{St}$  auf.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_L + \dot{Q}_K + \dot{Q}_{St} \quad (4.8)$$

$$\dot{Q}_L = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot \Delta T \quad (4.9)$$

$$\dot{Q}_K = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (4.10)$$

$$\dot{Q}_{St} = c_s \cdot \epsilon_{12} \cdot A \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (4.11)$$

Der Anteil der Wärmestrahlung kann vernachlässigt werden, weil diese nur einen wesentlichen Einfluss bei Temperaturen von oberhalb 1000 K bzw. bei fehlender Wärmeleitung und Konvektion besitzt [HER00, WAG93]. Mit den oben genannten Gleichungen sind die einzelnen Wärmeübertragungsanteile für den allgemeinen Fall berechenbar. Für eine komplexe Konstruktion ist eine Berechnung jedoch nicht möglich [DET75]. Dieser Ansatz wird auch von Charkhvorostov [CHA02] verfolgt. Die Bestimmung der an dem Wärmeübergang beteiligten Flächen ist nicht hinreichend genau möglich, die Temperaturdifferenzen sind über die Fläche nicht konstant. Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  wird durch viele Faktoren beeinflusst und ist über die Oberfläche stark schwankend.

Für die konkrete technische Anwendung behilft man sich mit empirisch ermittelten Zusammenhängen geometrischer Ähnlichkeit wie u. a. In [CIC90, GRI90, MÄU02, MAR97, MÜL03, WEN65] mit:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T \quad (4.12)$$

Der empirisch ermittelte Wert  $k$  enthält die Wärmeleitung der Konvektion und den Wärmestrahlungsanteil der Gleitpaarung und wird anteilmäßig in Werte von  $k_i$  aufgeteilt [MÜL03, BAE06, HEL82].

Geht man im idealisierten Fall davon aus, dass die gesamte Verlustleistung aus dem tribologischen Prozess in Reibungswärme umgesetzt wird, so bilden sich in den beteiligten Körpern entsprechende Wärmeströme aus. Da die Summe der beiden Wärmeströme, welche in die angrenzenden Materialien zu unterschiedlichen Anteilen abfließen, gleich der resultierenden Reibungswärme ist, kann ein Gleichgewichtszustand beschrieben werden:

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = p_N \cdot A \cdot \mu \cdot v \quad (4.13)$$

Die Wärmeströme  $\dot{Q}_i$  lassen sich jeweils durch die Form:

$$\dot{Q}_i = \Delta T \cdot A_i \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_i}{\lambda_i}} \quad (4.14)$$

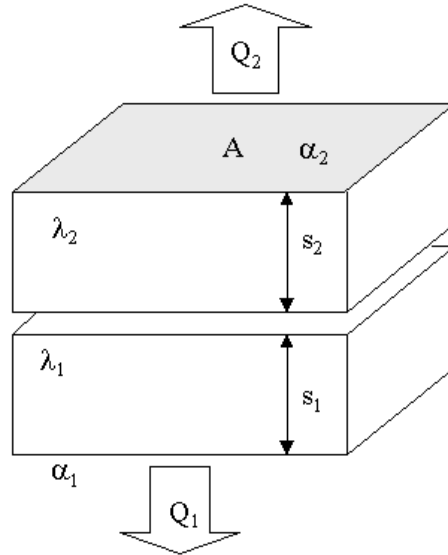


Abbildung 4.5 allgemeines Modell zur Wärmeab-  
leitung aus dem Kontaktbereich

beschreiben, welche der stationären Wärmeleitung der Gleichung 3.12 entspricht. Dabei sind für beide Reibpartner die Temperatur im Kontaktbereich und die Umgebungstemperatur gleich. Es ergibt sich nach Umstellung und Zusammenfassung der Gleichungen eine Temperaturerhöhung in der Kontaktfläche von:

$$\Delta T = \frac{p_N \cdot \mu \cdot v \cdot A}{\frac{A_1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1}} + \frac{A_2}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{s_2}{\lambda_2}}} \quad (4.15)$$

Führt man für

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1}} + \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{s_2}{\lambda_2}} = k \quad (4.16)$$

und setzt  $A = A_1 = A_2$  so erhält man:

$$\Delta T = \frac{p_N \cdot \mu \cdot v}{k} \quad (4.17)$$



diese Form entspricht der Gleichung 4.12. Es ist notwendig, den Wärmeübergangskoeffizienten  $k$  jeweils für unterschiedlich konstruktive wie auch technologische Bedingungen anzugeben [BER00].  $k$  beeinflusst die Kontakttemperatur linear und ist unabhängig von der Fläche, da angenommen wird, dass der Wärmetransport senkrecht zur Kontaktfläche erfolgt.

#### **Bewertung der Modellvorstellungen**

Das System Zahnriemen.- Stützschiene kann auf das Modell in Abbildung 4.4 reduziert werden. Dabei sind die Wärmeströme durch farbige Pfeile gekennzeichnet. Zum Einen strömt die an der Wirkstelle entstehende Wärmemenge in die ständig in Kontakt stehende Stützschiene und zum Anderen in den sich in Umlauf befindenden Zahnriemen. Die Verhältnisse in der Stützschiene werden im Wesentlichen durch die Wärmeleitzahl  $\lambda$  und der Dicke der einzelnen Schichten sowie die Temperaturdifferenzen gekennzeichnet. Aber auch die geometrische Form der Reibfläche, die Größe und Lage sowie die Strömungsverhältnisse der Oberfläche und die Umgebungstemperatur haben einen starken Einfluss auf die Temperaturverhältnisse in der Kontaktzone. Dies wird durch die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  gekennzeichnet. Bei der Wärmeabgabe des Zahnriemens beeinflussen ebenso alle oben genannten Faktoren das Temperaturverhalten. Dazu kommt jedoch noch der Kontakt zu den beiden Zahnscheiben und der Kontakt zum Transportgut, welches sich während des Transports erwärmen kann. Dabei werden ebenso wie im unteren Abschnitt entsprechende Wärmemengen abgeführt.

Eine Gesamtbeschreibung dieses Systems ist auf Grund von fehlenden Randbedingungen nur annähernd möglich. Abweichend vom idealen Modell nach Gleichung 3.12 sind die folgenden Annahmen zu treffen:

- der Wärmestrom breitet sich räumlich und nicht nur in Normalenrichtung aus,
- der Reibwert und somit die Reibleistung ändern sich über die gesamte Zeit,
- Ableitung des Wärmestroms an Stirn-, Seiten- und Kontaktflächen,
- kein ideal eingeschwungener Gleichgewichtszustand, da dieser erst nach theoretisch unendlicher Zeit erfolgt,
- keine gleichmäßige Temperaturverteilung über die gesamte Oberfläche,
- veränderliche Strömungsverhältnisse über die Oberfläche,
- keine konstanten  $\lambda$ - und  $\alpha$ -Werte,
- leicht veränderliche Umgebungstemperatur über den Versuchszeitraum.

Die Kontakttemperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer und Funktionssicherheit der Fördereinrichtung. Rechnerisch lässt sich die Temperatur, welche sich in der Wirkstelle durch die Reibungswärme und der Umfeldkonstruktion einstellt, über die Wärmebilanz abschätzen. Diese Berechnung ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet, da die thermodynamischen und konstruktiven Kennwerte nur unzureichend bestimmt werden können und entsprechenden Schwankungen unterworfen sind und die Wärmeableitung beeinflussen. Die Bestim-

mung der Kontakttemperatur kann deshalb nur durch eine empirische Gleichung für den entsprechenden Anwendungsfall näherungsweise ermittelt werden.

### 4.4 FEM-Analyse

Thermische Erscheinungen an Bauteilen werden häufig im Vorfeld durch Simulationsprogramme analysiert, welche nach dem FEM-Prinzip (Finite Elemente Methode) arbeiten.

Mittels FEM werden Bauteile in eine Anzahl endlicher (finite) Zellen aufgeteilt. Somit ergibt sich eine Netzstruktur, die Geometrie und Eigenschaften des Bauteils beschreibt. Diese Elemente weisen eine bestimmte mathematische Beschaffenheit bezüglich der gewünschten Analyse auf. So lassen sich statische, thermische und Schwingungsprobleme behandeln.

Die Temperaturdifferenzen von gegenüberliegenden Flächen dieser Zellen führen zu kleinen materialspezifischen Wärmeströmen. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen (Verlustwärme, Temperatur der Wärmesenke, Konvektion, ...) lässt sich für das Gesamtsystem eine komplette 3D-Temperaturkarte erstellen. Für die Simulation wurde die Software ANSYS verwendet.

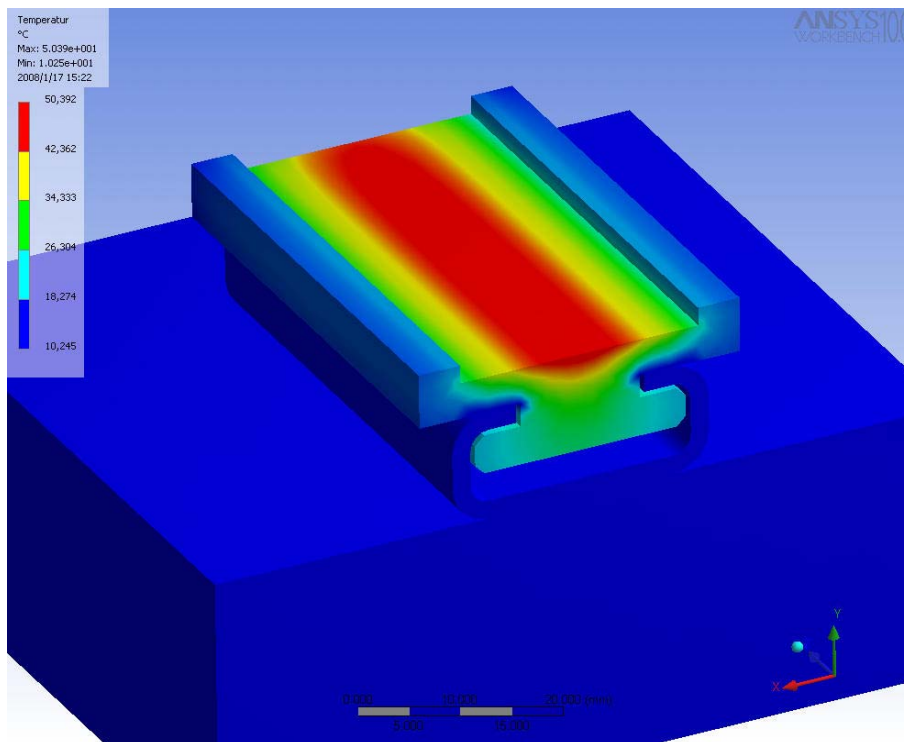


Abbildung 4.6: Bild des simulierten Temperaturverlaufs einer PE-UHMW Schiene im C-Profil bei Wärmeeinbringung von oben

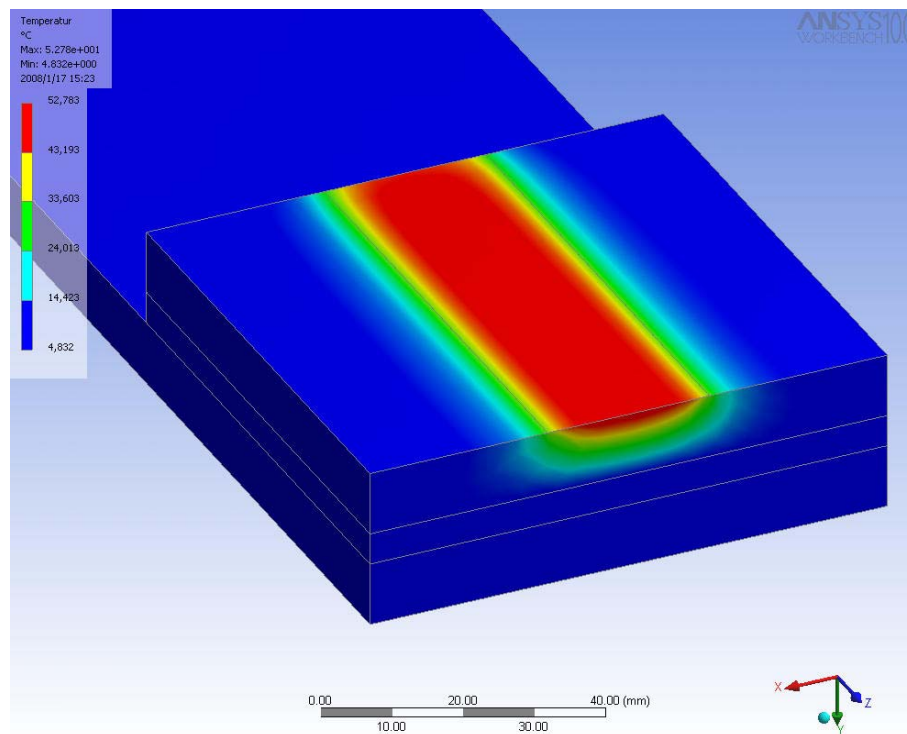


Abbildung 4.7: Bild des simulierten Temperaturverlaufs einer PE-UHMW Platte 10 mm bei Wärmeeinbringung von oben

Die Simulation der Stützschiene nach Abbildung 2.10 ergibt für die Annahmen einer Gleitschiene aus PE-UHMW, einem C-Profil aus Stahl und einer Gestellbefestigung aus Stahl unter Einleitung eines konstanten Wärmestroms in der Wirkstelle einen Temperaturverlauf nach Abbildung 4.6. Die Temperaturverteilung über die Breite der Einwirkfläche ist nicht isotherm, es ergeben sich Temperaturmaxima in der Gleitbahnmitte von 50 Kelvin, die zum Rand hin um ca. 25 Kelvin absinken. Es ist ein starkes Gefälle der Temperatur mit zunehmender Entfernung vom Einwirkort festzustellen. Die Temperaturgradienten resultieren aus der geringen Wärmeleitfähigkeit der Stützschiene. Wird eine PE-UHMW Platte mit dem gleichen Wärmestrom auf gleicher Einwirkfläche beaufschlagt (Abbildung 4.7), ergeben sich vergleichbare Temperaturverteilungen wie in der Schiene. Bei gleichen Randbedingungen beträgt das Temperaturmaxima ebenfalls 50 K, die Ausdehnung dieser Zone ist etwas breiter. In einer Tiefe von 10 mm ist noch eine Temperaturerhöhung von 10 K zu verzeichnen. Das thermische Verhalten dieser Platten und Schienen aus PE-UHMW ist vergleichbar.

Wird mit dem gleichen Wärmestrom auf die gleiche Fläche auf eine thermisch nicht isolierte Stahlplatte eingewirkt (Abbildung 4.8), ergeben sich deutlich geringere Temperaturmaxima, (11,5 K) die Verteilung der Temperatur ist sehr gleichmäßig über die Probenbreite und -tiefe.

Das Einfügen einer thermischen Isolierschicht (PE-UHMW 5 mm) zwischen Stahlprobe und Gestellbaugruppe ergibt eine Erhöhung der Kontakttemperatur auf 17 Kelvin bei gleichmäßiger Verteilung in der Probe. In der Isolierschicht ist ein starkes Temperaturgefälle zu verzeichnen, die Übertemperatur an der Gestellbaugruppe beträgt 10 Kelvin. Die Verwendung von Stahlplatten mit entsprechenden Isolierschichten ist für die Analyse der Wirkung von Schichtstärken geeignet, da durch den hohen Wärmeleitwert von Stahl eine gleichmäßige Temperaturverteilung in der Stahlprobe zu erwarten ist.

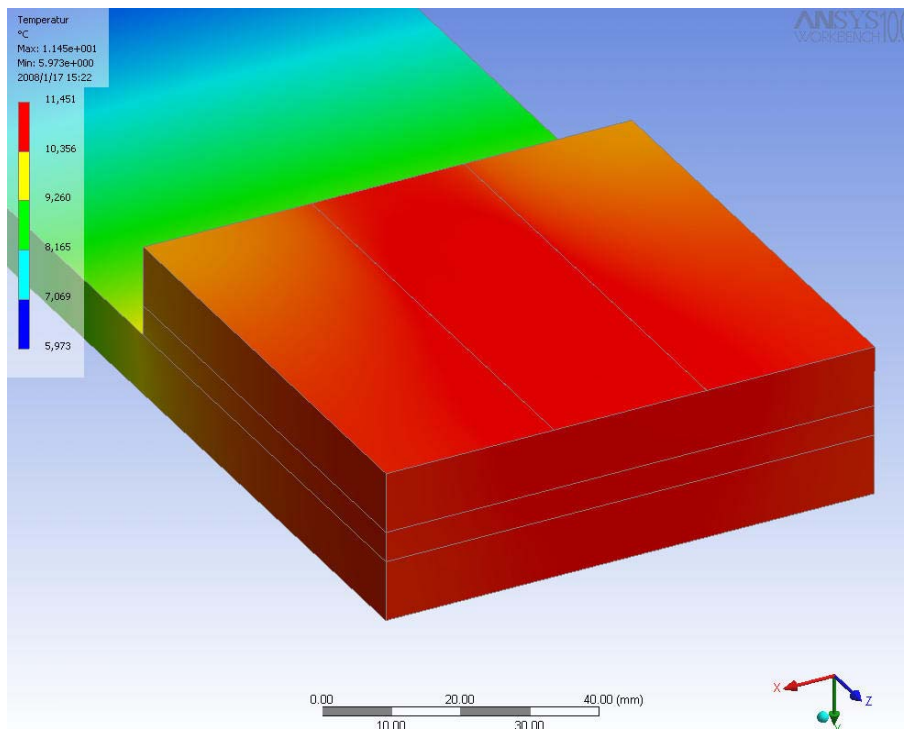


Abbildung 4.8: Bild des simulierten Temperaturverlaufs einer Stahlplatte bei Wärmeeinbringung von oben.

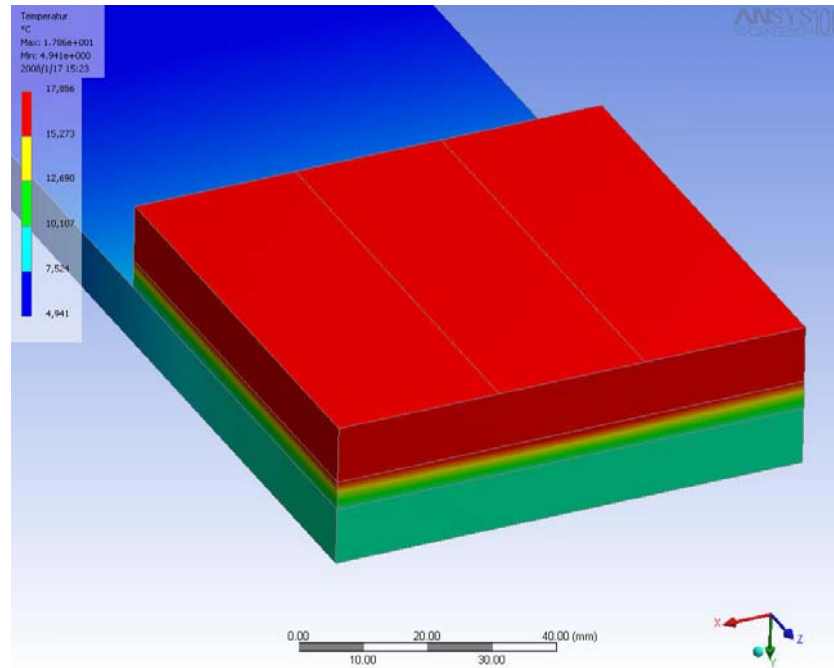


Abbildung 4.9: Bild des simulierten Temperaturverlaufs einer Stahlplatte mit 5 mm mit PE isoliert bei Wärmeeinbringung von oben

Die Temperaturverteilung am Zahnriemen ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die Temperaturerhöhung am Zahnriemenkopf beträgt 50 Kelvin und ca. 18 Kelvin am Zahnriemenrücken. Dieser Temperaturgradient lässt sich mit der geringen Wärmeleitfähigkeit des Polyurethans und der relativ großen wärmeabgebenden Oberfläche erklären.

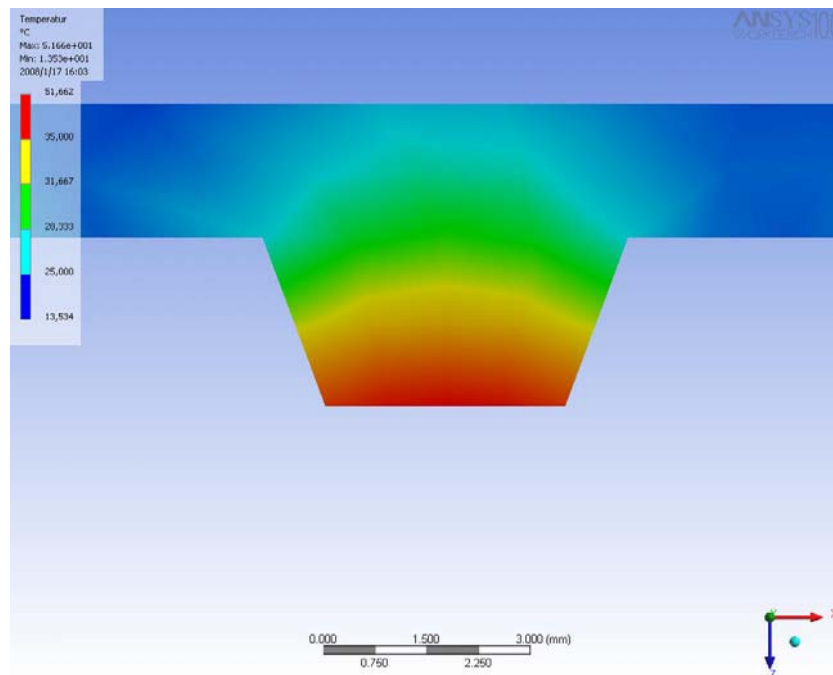


Abbildung 4.10: Temperaturverteilung am Zahnriemen

## 4.5 Theoretische Überlegungen zur Belastung des Systems Zahnriemen - Stützschiene

Die wichtigsten Einflussgrößen für das tribologische System Zahnriemen - Stützschiene sind:

- Eigenschaften der Einzelmaterialien (Härte, Wärmeleitfähigkeit, E-Modul, ...),
- Oberflächeneigenschaften der Gleitflächen (Rauheit, Beschichtung, ...)
- Relativgeschwindigkeit der Gleitpartner,
- Pressung zwischen im Kontaktbereich,
- Umgebungstemperatur,
- Belastungszeit,
- konstruktive Gegebenheiten.

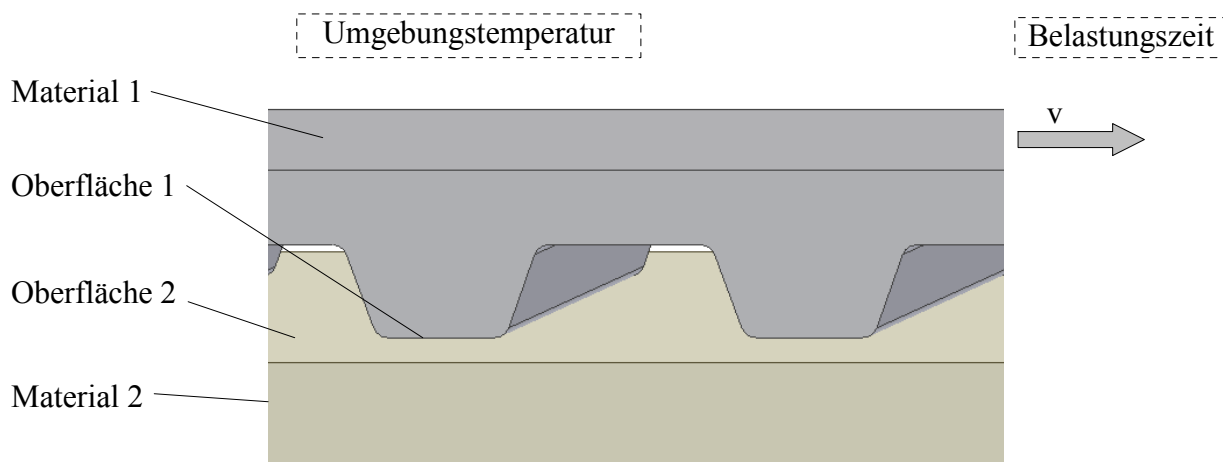


Abbildung 4.11: Einflussgrößen auf das System

Dabei sind die Einzeleinflüsse durch Art und Dauer der Beanspruchung (technologische Bedingungen), konstruktive Realisierung, Materialeigenschaften und Umgebungseinflüssen unterschiedlich stark ausgeprägt.

Diese Einflussgrößen wirken sich auf die Reibung, den Verschleiß und die Kontakttemperatur aus, wobei sich die wiederum selbst beeinflussen können (Abbildung 4.12).

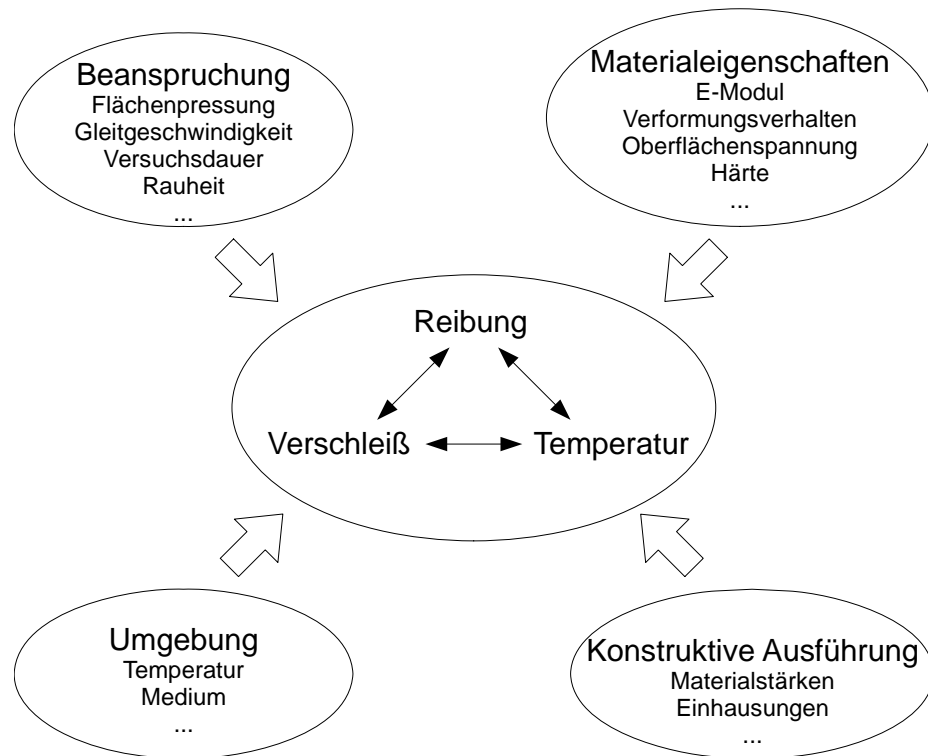


Abbildung 4.12: tribologisches System Zahnriemen - Stützschiene

Eine vollständige Erfassung aller Einflussgrößen und deren Bewertung ist oft nicht möglich, da die Zusammenhänge und Wechselwirkungen in diesem System sehr komplex sind und der Einfluss einzelner Parameter im System unterschiedlich stark ausgeprägt ist.





## 5 Experimentelle Untersuchungen

### 5.1 Übersicht und Versuchsstrategie

Die durchgeführten Untersuchungen lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

- Kurzzeitversuche: Ermittlung des Reibwertes von Zahnriemen- Gleitschienen-Paarungen bei unterschiedlicher Belastung ( $t < 8 \text{ h}$ ),
- Daueruntersuchungen an ausgewählten Paarungen: Ermittlung des Reibungs- und Verschleißverhaltens bei Dauerbelastung ( $t > 7 \text{ d}$ ),
- Thermische Untersuchungen: Ermittlung der Kontakttemperatur bei unterschiedlicher Belastung und konstruktiven Aufbau.

Ziel war es, eine Auswahl von konstruktiven und technologischen Parametern, welche das Tribosystem wesentlich beeinflussen, zu untersuchen und bei bestimmten Paarungen die Einsatzgrenzen zu bestimmen. Für die Auslegung und Dimensionierung von Zahnriemenfördereinrichtungen ist der Reibwert zwischen Stützschiene und Riemen von besonderem Interesse, da dieser sowohl für die Berechnung der Zugstrangfestigkeit als auch die Zahnfußfestigkeit unabdingbar ist. Die Ermittlung dieses Parameters für die meist eingesetzten PU- und PAZ-Zahnriemen an technisch bedeutsamen Stützschiene, in einem entsprechenden Belastungsspektrum und Zeitdauer der Einwirkung, ermöglichen eine sichere Auslegung entsprechender Anlagen. Die Entwicklung einer Berechnungsform für die Kontakttemperatur, als weiteres Auslegungskriteriums von entsprechenden Fördereinrichtungen, aus Betriebsparametern und konstruktivem Aufbau, stellt ein wesentliches Ziel der Arbeit dar und soll durch entsprechende Versuche gesichert werden. Aus den Untersuchungen sollen weiterhin Schlussfolgerungen für den praktischen Einsatz abgeleitet werden.

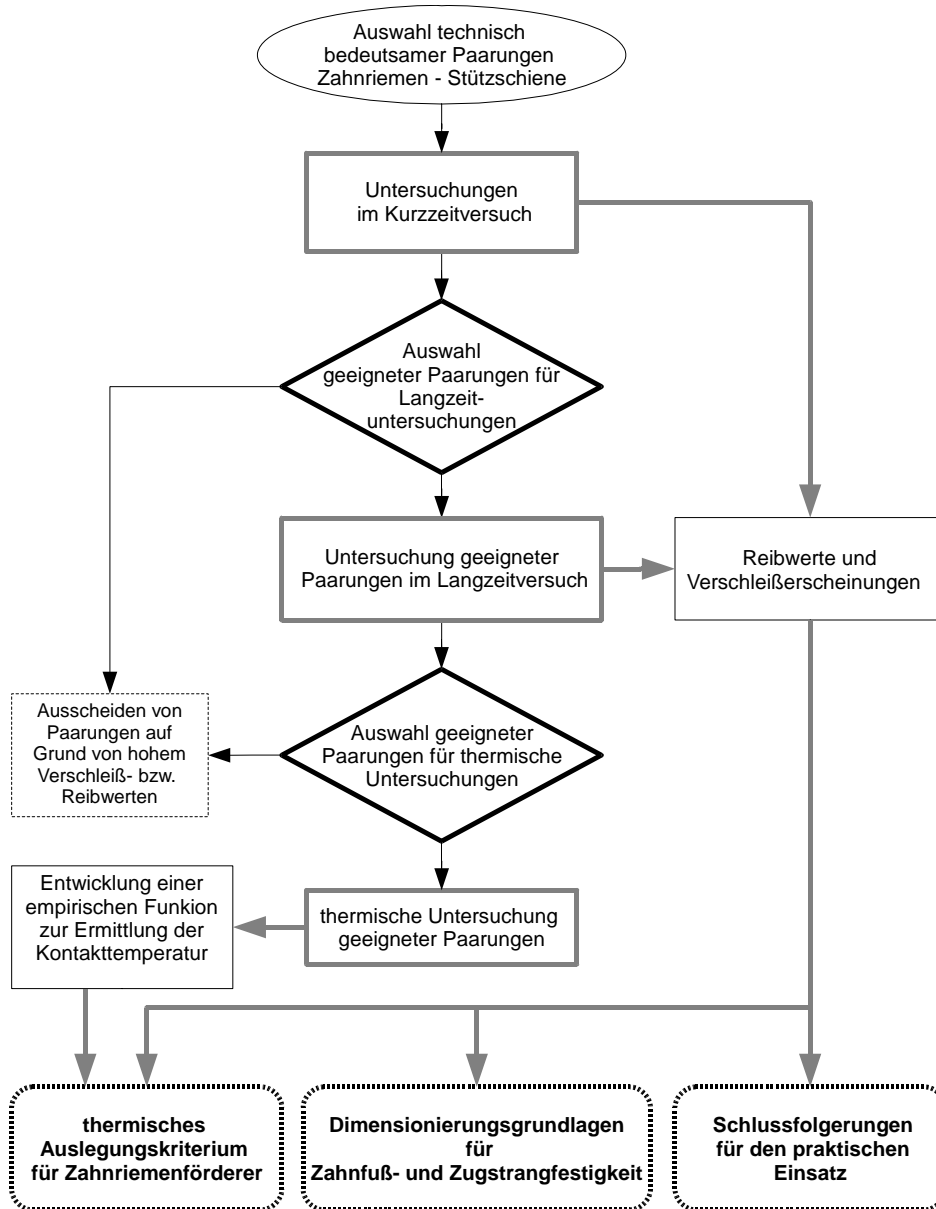


Abbildung 5.1: Versuchsablauf und Zielsetzung

In Abbildung 5.1 ist die prinzipielle Vorgehensweise der Versuchsplanung und -auswahl dargestellt. Für Kurzzeituntersuchungen (bis ca. 8 h) wurden Paarungen ausgewählt, welche in technischen Ausführungen meist eingesetzt und von den Herstellern empfohlen werden. Dabei wurden insbesondere die Gleitgeschwindigkeit und die Flächenpressung variiert und das Reibwert- und Verschleißverhalten beobachtet. Die Ergebnisse dienten zur Auswahl geeigneter Paarungen für tribologische Langzeituntersuchungen ( $t > 7\text{d}$ ). Für die thermischen Untersuchungen wurden Paarungen herangezogen, welche im Langzeitversuch positive Ergebnisse erbrachten. Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen Schlüsse über den praktischen Einsatz bestimmter Paarungen zu, schaffen verbesserte Dimensionierungsgrundlagen für die Auslegung entsprechender Anlagen und Erfassen deren thermisches Verhalten sowie Reibwertentwicklungen.

## Ableitung der Anforderungen für den Prüfstand

Für die Untersuchungen an unterschiedlichen Zahnriemen und Stützschiene sind folgende Anforderungen an den Versuchstand zu stellen:

- Variation der Gleitgeschwindigkeit,
- mehrstufige Änderung der Flächenpressung,
- Ermittlung und Aufzeichnung von Reibwerten über den gesamten Versuchszeitraum,
- Ermittlung und Aufzeichnung von Kontakttemperaturen in unmittelbarer Nähe der Wirkfläche über den gesamten Versuchszeitraum,
- reibungsarme Abstützung der Versuchsanordnung zur Vermeidung zusätzlicher Wärmeintragung,
- Möglichkeit von Kurzzeituntersuchungen (ca. 8 Stunden) und Langzeituntersuchungen (über 100 Tage),
- Untersuchung mehrerer, auch unterschiedlicher, Paarungen bei gleicher Geschwindigkeit und unterschiedlicher Pressung,
- geringe Beeinflussung der Untersuchungen durch Umfeldkonstruktion und Umgebung.

## 5.2 Versuchsaufbau

Der konzipierte und gebaute Versuchstand für die experimentellen Untersuchungen lässt eine Erprobung unter realitätsnahen Bedingungen durch vollständige Nutzung der gesamten Riemen- und Stützschiene in dieser Anordnung in Laufrichtung beansprucht. Die Einrichtung ist für Kurzzeitversuche, aber auch für Dauerversuche im Zeitraum von mehreren Monaten ausgelegt.

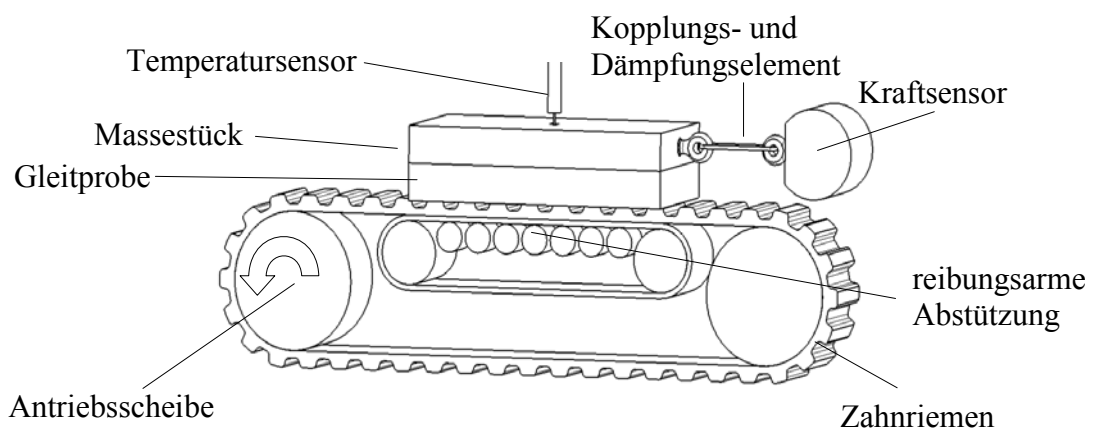


Abbildung 5.2: Schematischer Versuchsaufbau

Der Versuchsstand ist in Abbildung 5.2 schematisch dargestellt. Von der Motorwelle wird ein Moment über ein Zahnriemengetriebe auf die Antriebswelle für die Versuchszahnriemen übertragen. Die Riemen werden auf der Unterseite mit jeweils einer glatten Spannrolle gespannt. Die Zahnriemen werden mit der Zahnseite nach außen aufgespannt und liegen mit dem Rücken auf einem mitlaufenden Band auf, welches wiederum von einer Röllchenbahn abgetragen wird. Dadurch wird die Reibung zwischen Riemenrücken und der Unterlage weitestgehend ausgeschlossen und eine weitere Erwärmung außerhalb der Wirkstelle minimiert. Auf die Zahnoberseite wird mittels Massenstücken, die auf den Proben der Stützschiene aufliegen, die Normalkraft definiert aufgebracht. Zwischen Probe- und Massenstück können Isoliermaterialien verschiedener Stärke eingebracht werden. Die Reibkraft wird über Kraftaufnehmer ermittelt, welche die Probenstücke mit dem Gestell verbinden. Die ermittelten Messwerte werden einem Rechner übergeben und aufgezeichnet.

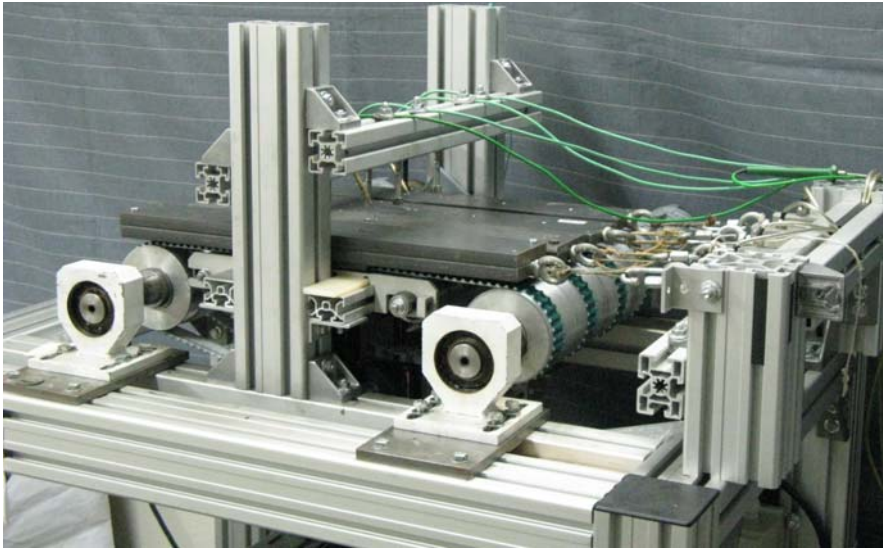


Abbildung 5.3: Versuchsaufbau im Labor

Die Temperatur der Gleitfläche wird mit NiCr-Ni-Thermoelementen mit einem Durchmesser von 0,5 mm gemessen. Diese befinden sich in einer Bohrung, welche von der Probenrückseite her aufgebracht wurde und unmittelbar vor der Lauffläche endet. Die gemessenen Temperaturen werden ebenfalls an den Rechner übergeben und aufgezeichnet.

Auf diesem Versuchsstand können parallel bis zu vier Zahnriemen untersucht werden. So lässt sich eine deutlich höhere Effektivität gegenüber Einzelversuchen erzielen. Die Geschwindigkeit der Riemen ist dabei jeweils gleich, es kann jedoch die Massenkraft für jeden einzelnen Riemen variiert werden.

## 5.3 Versuchsbedingungen

### 5.3.1 Versuchsparameter

Für die Untersuchungen wurden folgende Parameter variiert:

- Zahnriemen: PU-Zahnriemen, PAZ-Zahnriemen,
- Stützschiennenmaterial: PE-UHMW, Schichtholz, Stahl, PTFE, PA 6 G Öl, Aluminium,
- Gleitgeschwindigkeit: (0,15m/s), 0,25 m/s ... 2,75 m/s,
- Flächenpressung: 0,002 N/mm<sup>2</sup> ... 0,036 N/mm<sup>2</sup>,
- Oberflächenrauheit: Stahl Rz 6,3; Rz 25, Aluminium: Rz 4, Rz 25,
- Isolierschichtstärke: 2 mm . . 10 mm.

Die Variation der Versuchsparameter wurde nicht vollständig durchgeführt, sondern der Materialkombination bzw. der Zielstellung angepasst.

### Zahnriemen

Für die Versuche standen endlos verschweißte Polyurethanzahnriemen nach DIN 7721 mit einer Länge von 1250 mm und einer Breite von 25 mm zur Verfügung (Riemen DIN 7721 25 T10 x 1250).

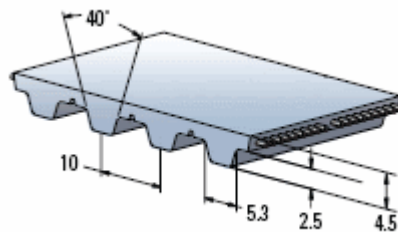


Abbildung 5.4: Zahnriemen T10 (Quelle: MEC07)

Im einzelnen kamen folgende Varianten zum Einsatz:

- PUR ZR weiß mit Stahlzugträger ohne Beschichtung Shorehärte 43 D
- PUR ZR grün mit Aramidzugträgern ohne Beschichtung Shorehärte 43 D
- PUR ZR weiß mit Stahlzugträger und Polyamidgewebe-Beschichtung grau
- PUR ZR grün mit Aramidzugträgern und Polyamidgewebe-Beschichtung grün

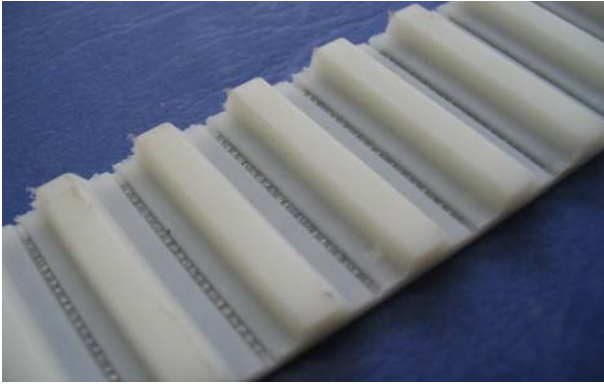


Abbildung 5.5: Polyurethanzahnriemen, Breite: 25 mm

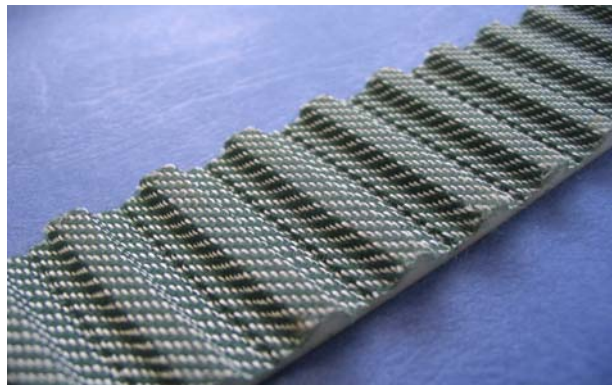


Abbildung 5.6: Zahnriemen mit Polyamidgewebebeschichtung, PAZ, Breite: 25 mm

Das Beschichtungsmaterial für die Zahnriemen bestand aus grauem bzw. grünem Polyamidgewebe und wird von verschiedenen Herstellern im Sortiment geführt.

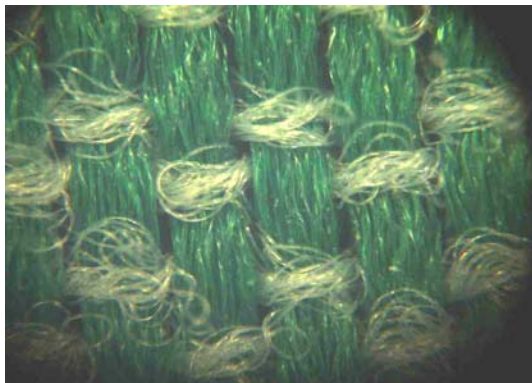


Abbildung 5.7: PAZ grün

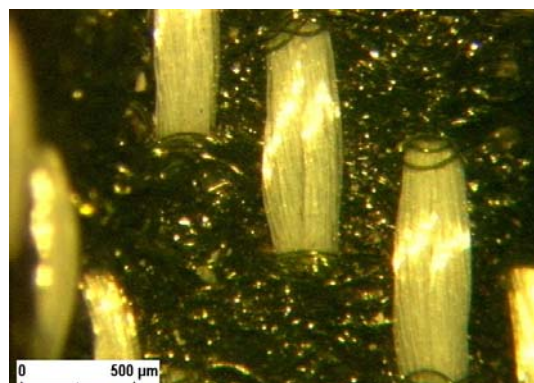


Abbildung 5.8: PAZ grau

Bei dem Gewebe aus grünem Material handelt es sich um Polyamidgewebe PA 6.6 in Leinwandbindung mit unelastischen grünen Schussfäden und texturierten, stark elastischen Kettfäden.

Das graue Material ist ein Polyamidgewebe in Körperbindung mit unelastischen weißen Schussfäden und texturierten, wenig elastischen grauen Kettfäden.

Beide Gewebearten werden während der Fertigung auf die Oberfläche des Polyurethan aufgebracht.

## Stützschiennenmaterial

Die entsprechenden Materialien für die Probenkörper wurden auf Grund ihrer breiten Verwendung in Fördersystemen ausgewählt. PTFE wird selten in reiner Form in entsprechenden Anlagen eingesetzt und diente als Vergleichsprobe.

Die Stützschiennen bestehen aus dem zu untersuchenden Material mit einer Breite von 80 mm und einer Länge von 150 mm.

Zum Einsatz kamen folgende Materialien:

- Polyethylen UHMW verschiedene Dicken (2..20 mm),
- Stahl glatt, geschliffen,  $R_z = 6,3 \mu\text{m}$ ,
- Stahl rau, überfräst,  $R_z = 25 \mu\text{m}$ ,
- Schichtholz (Buche, Schäl furnier), in Faserrichtung,
- Aluminium, geschliffen :  $R_z = 4 \mu\text{m}$ , (wenige Versuche - Vergleichsprobe)
- Aluminium rau, überfräst,  $R_z = 25 \mu\text{m}$ , (wenige Versuche - Vergleichsprobe)
- PTFE, (wenige Versuche - Vergleichsprobe)
- PA6 Guss Öl (wenige Versuche – Vergleichsprobe).

**Schichtholz:** Holzwerkstoff, bei dem mehrere Furniere mit gleicher Faserrichtung zusammengeklebt sind. Durch diese Art der Verklebung erhalten die Schichtholzplatten eine große Festigkeit und Steifigkeit. Schichtholz wird in einer Dicke bis zu 100 mm gefertigt.

Schichtholz wird für Konstruktionen mit hoher Biege- und Zugbeanspruchung verwendet, zum Beispiel für Sportgeräte, Möbelteile oder im Flugzeug- und Modellbau.

Die Eignung als Stützschiene für Zahnriemenförderer aber auch allgemein bei Fördersystemen ergibt sich aus der guten Ver- und Bearbeitbarkeit, hoher Steifigkeit, geringem Verschleiß, Verfügbbarkeit und geringem Preis.

## **Eigenschaften der polymeren Gleitschienenmaterialien:**

### **PA6 G + Öl**

PA6-G Öl ist ein Gusspolyamid mit fein verteiltem Öl, Festschmierstoff und Stabilisator in der teilkristallinen Gefügestruktur. Polyamide sind thermoplastische Polymere und zeichnen sich durch eine hohe Zähigkeit, Festigkeit und Steifigkeit aus und besitzen eine gute Chemikalienbeständigkeit und Verarbeitbarkeit bei hohem Verschleißwiderstand und guten Gleiteigenschaften. Der Werkstoff weist die höchste Verschleißfestigkeit aller technischen Polyamide (bis zu 5-fach höhere Verschleißfestigkeit bei Gleitanwendung) auf und hat einen niedrigen Reibungskoeffizienten bei Trockenlauf. Der Werkstoff ist universell einsetzbar für Gleit- und Bewegungsbeanspruchung und durch die zugesetzten Komponenten selbstschmierend.[DOM08]

### **PE-UHMW**

Der teilkristalline, unpolare Kunststoff Polyethylen gehört zur Gruppe der thermoplastischen Polymerwerkstoffe. PE-UHMW (ultrahochmolekulares Polyethylen) besitzt eine mittlere Molmasse von bis zu 6000 kg/mol bei einer Dichte von 0,93–0,94 g/cm<sup>3</sup>. UHMW steht für "ultra high molecular weight". Durch hohe Zähigkeit und Reißdehnung bei hoher Chemikalienbeständigkeit und guter Ver- und Bearbeitbarkeit findet PE-UHMW eine breite Anwendung bei der Handhabung von Massengütern. Aufgrund von geringem Verschleiß gegenüber anderen Polymeren und guten Gleiteigenschaften wird PE-UHMW als Lagerwerkstoff bei geringen Lasten sowie als Gleitschienenmaterial für Ketten-, Zahnriemen- und Gurtförderer eingesetzt. [DOM08]

### **PTFE**

Polytetrafluorethylen, bekannt auch unter dem Handelsnamen Teflon der Firma DuPont, ist ein unpolarer, thermoplastischer Kunststoff von milchig weißer Farbe, der sich wachsartig anfühlt. Aufgrund seiner besonderen Werkstoffeigenschaften nimmt er im Vergleich zu anderen thermoplastischen Kunststoffen eine einzigartige Stellung ein. PTFE hat einen sehr geringen Reibungskoeffizienten zu den meisten Gleitpartnern. Meist ist die Haftreibung genauso groß wie die Gleitreibung, so dass der Übergang vom Stillstand zur Bewegung ohne Rucken stattfindet. Durch seine geringe Reibung wird PTFE als Beschichtung für Lager und Dichtungen eingesetzt. Dabei besteht die Möglichkeit, durch die Beimischung von Füllstoffen (Compoundierung) eine Anpassung der physikalischen Eigenschaften des PTFE an spezifische Einsatzbedingungen zu bewirken. Durch Beigabe von Füllstoffen wird insbesondere die Kriechneigung unter mechanischer Belastung verringert.

Zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Elastomeren und Thermoplasten ist die Einarbeitung von PTFE als Festschmierstoff möglich.

PTFE ist beständig gegen alle Säuren und Basen, Alkohole, Ketone, Benzine und Öle und kann bis zu einer Temperatur bis 260°C eingesetzt werden.[DOM08]



### 5.3.2 Versuchsdurchführung

Es soll die Grenzbelastung von verschiedenen Materialpaarungen ermittelt werden. Diese wurde für die Versuchsreihe auf 60°C Kontaktflächentemperatur bezogen, da aus Vorversuchen bekannt ist, dass ab dieser Temperatur irreversible Veränderungen am Zahnriemen bzw. Stützschiene auftreten und das System nicht mehr stabil arbeitet. Stützschiene aus PE-UHMW schmelzen bei dieser Kontakttemperatur auf und Reibwerte an PAZ-Riemen steigen stärker an.

Dabei sind die Gleitgeschwindigkeit und die Normalkraft zu variieren. Zusätzlich wurden bei ausgewählten Paarungen verschieden starke Isolierschichten aus PE-UHMW verwendet, um eine isolierschichtabhängige Erwärmung untersuchen zu können. Es sind jeweils die Temperatur und der Reibwert für den Grenzzustand zu ermitteln sowie die Reibwert/ Temperaturkurven über die Zeit festzuhalten.

Bei den Versuchen für die thermische Auswertung durch Isolierschichtänderung kam Polyethylen von 2 mm bis 10 mm mit einem  $\lambda$ -Wert von 0,42 W/K\*m zum Einsatz, um den Einfluss der Wärmeableitung über die Stützschiene genauer beschreiben zu können.

Im Versuchsablauf wurden die Normalkraft und damit die Flächenpressung sowie die Geschwindigkeit stufenweise geändert. Durch Variation von definierten Isolierschichten von 2 bis 12 mm wurde indirekt die Temperatur bei einigen Versuchen gezielt beeinflusst.

Die Geschwindigkeit wurde von 0,25 m/s beginnend schrittweise erhöht, bis sich die Grenztemperatur einstellt. Die maximale Gleitgeschwindigkeit für ausgewählte Paarungen betrug 2,75 m/s.

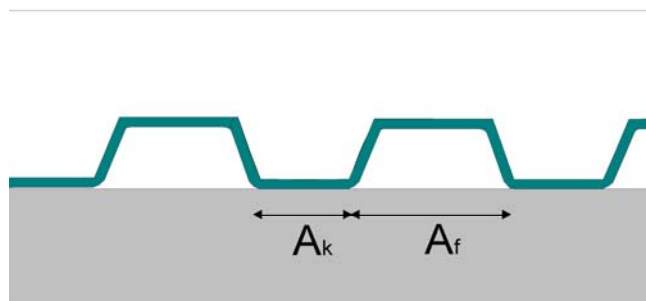


Abbildung 5.9: Kontaktfläche

In Abbildung 5.9 sind die geometrischen Bedingungen des Zahnriemens im Kontakt mit dem Reibpartner dargestellt. Für die hier beschriebene Flächenpressung wird immer die projizierte Fläche angenommen, auf die die Masse gleichmäßig verteilt wird, um Unsicherheiten bei der Bestimmung der realen Kontaktfläche auszuschließen. Dieses Vorgehen gewährleistet eine Vergleichbarkeit mit anderen Zahnkopfformen.

Die Flächenpressung wurde in Schritten von ca. 0,006 N/mm<sup>2</sup> gesteigert. Die Grundlast besteht aus der Probe selbst und einer Aufnahmeplatte. Da verschiedene Materialien mit unterschiedlichen Dicken untersucht wurden, ergaben sich unterschiedlich gestaffelte Flächenpressungen. Diese begannen mit 0,002 N/mm<sup>2</sup> (PE-UHMW, Schichtholz) bzw. 0,005 N/mm<sup>2</sup> (Stahl) bis zu einer maximalen Pressung von 0,04 N/mm<sup>2</sup> bei ausgewählten Paarungen.

### 5.3.3 Messwertaufbereitung

Die Aufzeichnung der Gleitreibwerte über mehrere Umläufe ist in den Abbildungen 5.10 und 5.11 dargestellt. Es sind deutliche Schwankungen der Reibwerte zu erkennen. Diese resultieren zum einen aus dem in den Kontakt eingreifenden neuen Flächen durch den Umlauf des Zahnriemen und zum anderen aus durch Inhomogenitäten am Riemenumfang. Für die Untersuchungen und Aufzeichnungen werden die Mittelwerte aller Messwerte über mehrere Umläufe ausgewertet. Dadurch wurde das ungleichmäßige Auftreten von Messwertschwankungen ausgeglichen.

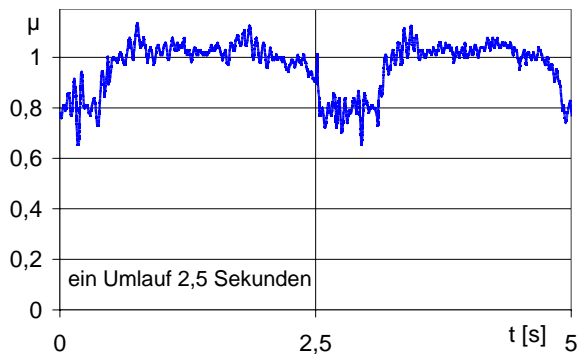


Abbildung 5.10: Reibwertverteilung über mehrere Umläufe ZR PU - Holz

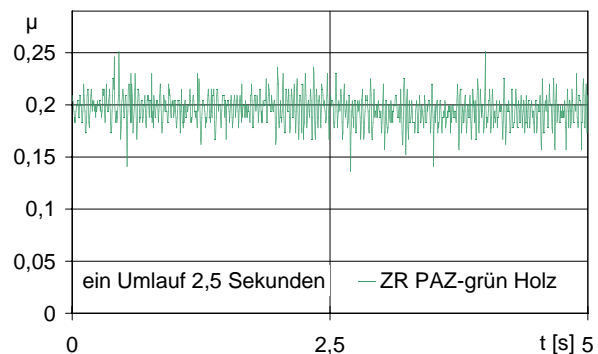


Abbildung 5.11: Reibwertverteilung über mehrere Umläufe ZR PAZ - Holz

Die Aufzeichnung der Reibwertmittelwerte erfolgt zeitgleich mit den Werten für die Kontakttemperatur und der Raumtemperatur. Die Intervalle wurden je nach Gesamtversuchsdauer zwischen 30 Sekunden (Kurzzeitversuche bis 8 Stunden) und 15 Minuten (Dauerversuche von über 30 Tage) gewählt.

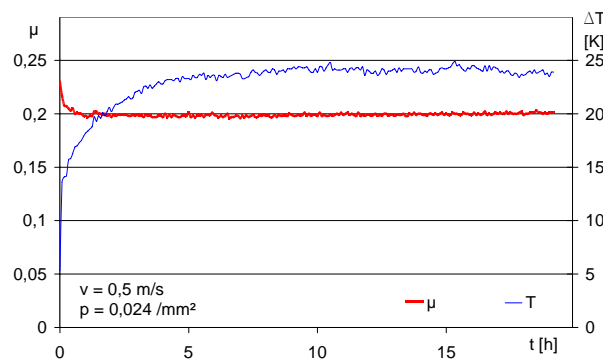


Abbildung 5.12: Reibwert- und Temperaturentwicklung  
ZR PAZ - PE-UHMW

Für die Betrachtungen der Abhängigkeit der Reibwerte und der Wärmeableitfähigkeiten von Geschwindigkeit, Flächenpressung und Temperatur wurden jeweils nach Erreichen eines relativ stabilen Reibwert- und Temperaturniveaus (nach ca. 5 .. 8 h) diese Werte festgehalten, da eine längere Versuchsdauer diese Werte im Kurzzeitbereich nicht mehr wesentlich beeinflusst (Abbildung 5.12).

## 5.4 Ergebnisse der Untersuchungen

### 5.4.1 Allgemeiner Verlauf von Reibwerten

Unabhängig von der Materialpaarung lässt sich eine charakteristische Veränderung von Reibwerten über einen entsprechenden Zeitraum erkennen. Diese Entwicklung kann in Bereiche unterteilt werden.

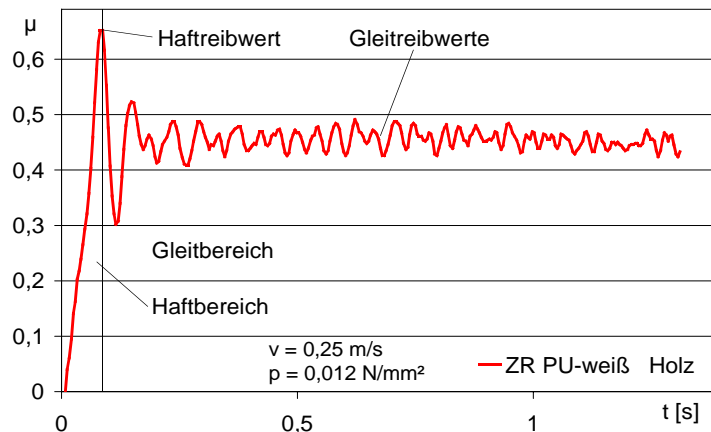


Abbildung 5.13: Übergang zwischen Haftreibung und Gleitreibung

Der Bewegungsbeginn als erster Bereich ist in Abbildung 5.13 dargestellt. Die Messwertaufzeichnungen bei gleichmäßig ansteigender Zugstrangkraft stellen alle Werte bis zur Überwindung der Haftreibung dar. Die adhäsiven Bindungen der Gleitpartner werden gebrochen. Der sich daran anschließende Bereich mit niedrigeren Werten spiegelt den Bereich des Widerstandes mit den entsprechenden Gleitreibwerten wieder. Dieses prinzipielle Verhalten lässt sich bei allen Paarungen, jedoch in unterschiedlich starker Ausprägung feststellen. Die Haftreibung ist die Reibung, bei der die angreifenden Kräfte nicht ausreichen, um eine Bewegung zwischen den Reibpartnern zu bewirken. Deshalb muss die Zugstrangkraft größer sein als der Haftwiderstand zwischen Stüttschiene und Zahnriemen, um den Haftwiderstand zu überwinden und eine Relativbewegung zu erzeugen. Die Haftreibwerte werden im Einzelnen nicht weiter betrachtet, da diese nur beim Anfahren von Bedeutung sind und in dieser Arbeit von einem kontinuierlichen Betrieb der Fördereinrichtungen ausgegangen wird. Der erhöhte Anfahrwiderstand wird in realisierten Anlagen über eine gezielte Ansteuerung der Anfahrrampe der Antriebe ausgeglichen.

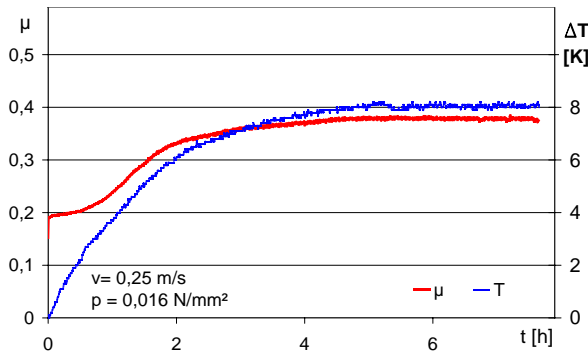


Abbildung 5.14: Einlauf der Gleitflächen innerhalb einiger Stunden PAZ Stahl Rz 6,3

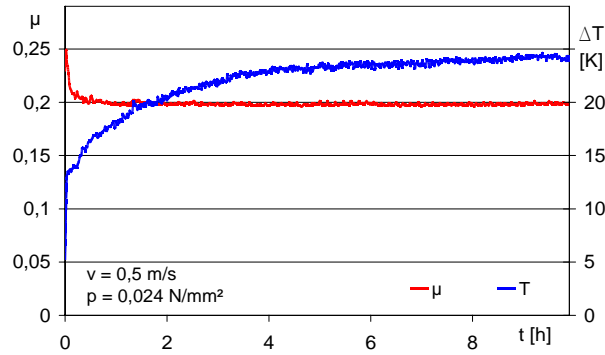


Abbildung 5.15: Einlauf der Gleitflächen innerhalb einiger Stunden PAZ PE-UHMW

Der Einlaufbereich der Gleitreibwertentwicklung ist in den Abbildungen 5.14 und 5.15 für verschiedene Stützschiene an PA-Gewebe-Zahnriemen dargestellt und lässt erkennen, dass in den ersten Stunden der Relativbewegung unter Last eine deutliche Veränderung der Reibwerte erfolgt. Die Erwärmung der Gleitflächen durch die zugeführte Reibleistung strebt einen Gleichgewichtszustand an. Dieser Abschnitt ist meist nach fünf bis acht Stunden beendet. In dieser Phase kommt es zu einer ersten Veränderung der Oberflächen durch Glättung und damit einer Vergrößerung der realen Kontaktflächen. Durch diese Annäherung der Oberflächen steigt der Reibwert infolge des höheren adhäsiven Anteils der Reibung bei der Paarung Stahl - PA-Gewebe an (Abbildung 5.14). An der Paarung PE-UHMW – PA Gewebe ist der Effekt der Reibwertzunahme durch geringere Adhäsionsarbeit auf Grund des unpolaren Charakters des Polyethylen nicht festzustellen. Der deformative Anteil der Reibung wird jedoch gesenkt, was insgesamt zu einer Senkung der Reibwerte während des Einlaufs führt. Der sich anschließende Zustand ist geprägt von relativ konstanten Reibwerten und Kontakttemperaturen.

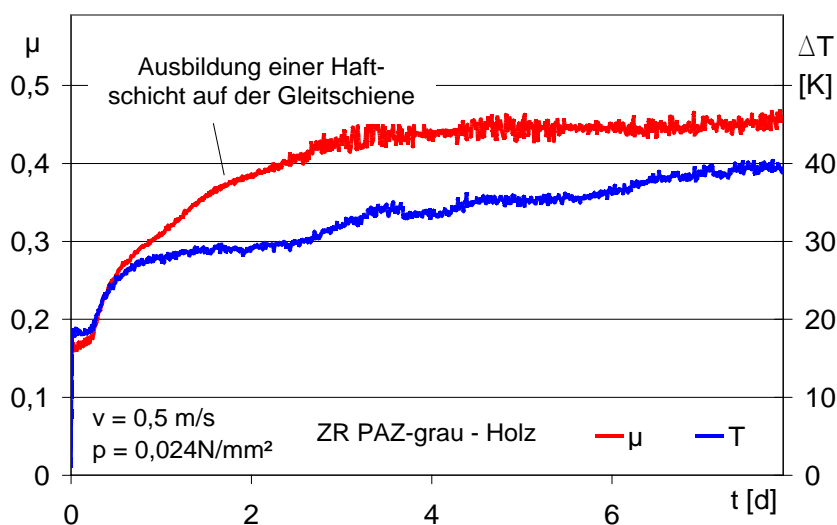


Abbildung 5.16: Reibwert- und Temperaturentwicklung ZR PAZ grau - Holz

Wird die Paarung weiter dynamisch belastet, erfolgt ein weiteres Einlaufen der Oberflächen mit entsprechenden Anpassungserscheinungen. Die Änderung der Reibwerte erfolgt stetiger. Eine weitere Veränderung der Oberflächenrauheit und erste Materialübertragungen erfolgen sowohl an Stahl- als auch Holzgleitflächen (Abbildung 5.17). In Abbildung 5.16 ist die Reibwert- und Temperaturentwicklung für die Paarung Schichtholz – PAZ- Zahnriemen über einen Zeitraum von 8 Tagen dargestellt.

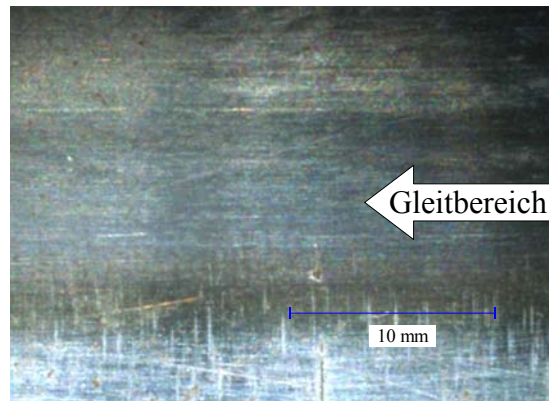


Abbildung 5.17: Materialübertrag auf Stahlgleitfläche Rz 6,3

Wird die Paarung weiter mit entsprechenden Belastungen betrieben, kommt es zum Verschleiß der Gewebeschicht und damit verbunden zu einer weiteren Reibwertsteigerung. Diese Steigerung kann bis zu 100 % betragen und ist mit einem deutlich sichtbaren Verschleiß an Zahnriemen und Gleitschiene gekennzeichnet. Die Steigerung erfolgt meist stetig über einen relativ langen Zeitraum. Die durch die Erhöhung der Reibwerte steigenden Reibleistungen und Kontakttemperaturen führen zu einer weiteren Schädigung der Gewebeschicht. Der sich daran anschließende Bereich ist im Wesentlichen durch den Kontakt von Polyurethan des Zahnriemens und der polymeren Oberfläche der Stützschiene geprägt. Das Gewebe hat seine tribologische Funktion verloren und wird teilweise vollständig abgetragen.

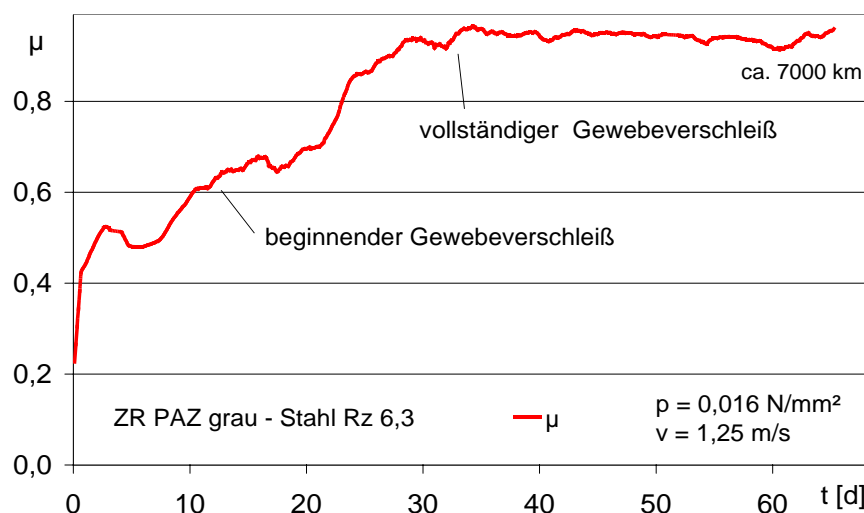


Abbildung 5.18: Reibwertänderung im Langzeitbereich Beispiel Stahl - PAZ

## 5.4.2 Reibwertverhalten bei kurzzeitiger Beanspruchung

### 5.4.2.1 Versuchsparmeter

In Kurzzeitversuchen sollen erste Erkenntnisse zum Reibwertverhalten im Einlaufbereich verschiedener Materialpaarungen bei steigenden Flächenpressungen und Geschwindigkeiten gewonnen werden. Die Versuchszeit betrug jeweils zwischen ca. 5 .. 8 Stunden und wurde dann als beendet angesehen, wenn Reibwert und Temperatur ein stabiles Niveau erreicht hatten. Es wurden für die Untersuchungen jeweils unbeschichtete und mit Polyamidgewebe beschichtete Zahnriemen mit den entsprechenden Stützschiene Materialien verwendet. Wurden hohe Verschleißraten bzw. sehr hohe Reibwerte festgestellt, sind die Versuche nur bis zum Feststellen der Unbrauchbarkeit als Gleitpaarung durchgeführt worden.

Tabelle 5.1: Kurzzeitversuche

Paarung	Geschwindigkeit	Flächenpressung	Bemerkung
Stützschiene: Schichtholz ZR: PU	0,25 m/s .. 2,25 m/s	0,002 N/mm <sup>2</sup> ; 0,024 N/mm <sup>2</sup> , (0,036 N/mm <sup>2</sup> )	
Stützschiene: Schichtholz ZR: PAZ	0,25 m/s .. 2,75 m/s	0,002 N/mm <sup>2</sup> .. 0,036 N/mm <sup>2</sup>	
Stützschiene: Stahl ZR: PU	0,15 m/s .. 1 m/s	0,005 N/mm <sup>2</sup> ; 0,016 N/mm <sup>2</sup>	Rz 6,3, Rz 25
Stützschiene: Stahl ZR: PAZ	0,25 m/s .. 2,5 m/s	0,005 N/mm <sup>2</sup> .. 0,04 N/mm <sup>2</sup>	Rz 6,3, Rz 25
Stützschiene: PE-UHMW ZR: PU	0,25 m/s .. 2 m/s	0,002 N/mm <sup>2</sup> ; 0,012 N/mm <sup>2</sup>	
Stützschiene: PE-UHMW ZR PAZ	0,25 m/s .. 1,5 m/s	0,006 N/mm <sup>2</sup> .. 0,036 N/mm <sup>2</sup>	
Stützschiene: PTFE ZR: PU	0,25 m/s, 0,75 m/s	0,015 N/mm <sup>2</sup>	
Stützschiene: PTFE ZR: PAZ	0,25 m/s; 0,75 m/s	0,015 N/mm <sup>2</sup>	
Stützschiene: PA6 G Öl ZR: PAZ	0,15 m/s; 0,25 m/s;	0,012 N/mm <sup>2</sup>	

### 5.4.2.2 Stützschiene material Schichtholz

#### PU-Zahnriemen - Schichtholz

Das Einlaufverhalten eines Polyurethanzahnriemens ohne Gewebebeschichtung in Verbindung mit einer Holzgleitschiene ist von einem schnellen Anstieg der Reibwerte, beginnend bei  $\mu = 0,6$  auf Werte von  $\mu = 0,9$  gekennzeichnet (Abbildung 5.19). Bei einem Reibwert von ca.  $\mu = 0,9$  nach 4 Stunden Versuchsdauer beginnt der Reibwert sehr deutlich in einem Bereich zwischen  $\mu = 0,75$  bis 1,25 zu schwanken. Mit diesen Schwankungen ist ein Verschleiben der Zahnköpfe festzustellen. Der Vorgang der sich einschwingenden Kontakttemperatur wird durch den beginnenden Verschleiß unterbrochen, Temperaturänderungen von 29 Kelvin fallen auf ca. 21 Kelvin Temperaturerhöhung ab. Ursache für diesen Temperaturabfall sind Verschleißpartikel, welche sich zwischen Schiene und Zahnriemen befinden und einen direkten Kontakt der Gleitpartner teilweise verhindern.

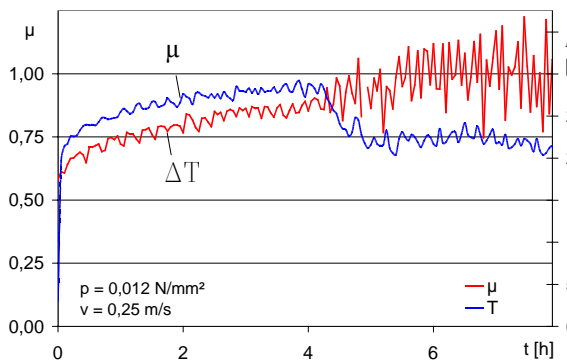


Abbildung 5.19: PU-weiß - Holz Einlauf

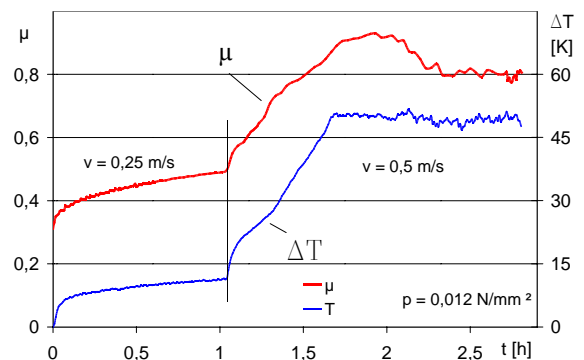


Abbildung 5.20: PU-grün - Holz Verschleiß nach Geschwindigkeitssprung  $RT = 22^{\circ}C$

Das plötzliche Einsetzen von Reibwertsteigerungen und Verschleißerscheinungen ist auch in Abbildung 5.20 dargestellt. Nach einer Geschwindigkeitssteigerung von 0,25 m/s auf 0,5 m/s beginnt der Reibwert stetig zu steigen. Durch die entstehende höhere Reibleistung (Geschwindigkeit und Reibwert) steigt ebenfalls die Kontakttemperatur auf Werte von  $72^{\circ}C$  an. Durch den einsetzenden Verschleiß des Zahnriemens und der damit entstehenden Partikel in der Wirkfläche ist kein weiterer Temperaturanstieg festzustellen. Die Reibwerte durchlaufen ein Maximum von  $\mu = 0,9$  um auf Werten um ca. 0,8 relativ stabil zu verharren.

Der Verschleiß am Zahnriemen beginnt, nachdem eine durch den Fertigungsprozess feste glatte Oberfläche durchbrochen ist. Bei der Extrusion der Riemen entstehen in der schnell erstarrenden Randschicht andere Eigenschaften als in darunter liegende Bereichen, da dort die Molekülketten schnell eingefroren werden. Das Auftreten dieser Materialinhomogenität mit verschleißfesten Randschichten ist bei Kunststoffen häufig festzustellen.

Der Wert des Reibungskoeffizienten von Holzgleitschienen mit PU-Zahnriemen schwankt sehr stark bei mehrfach durchgeführten Versuchen, unabhängig von Flächenpressung und Geschwindigkeit (Abbildung 5.21). Bei Absoluthöhe und Streuung ist kein Unterschied zwischen PU-grün und PU-weiß festzustellen.

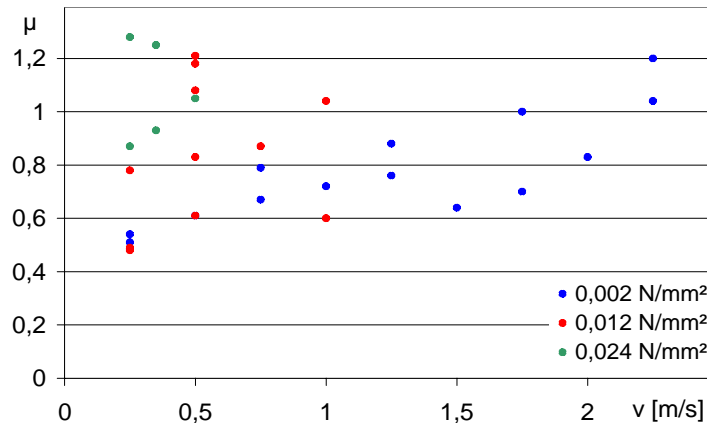


Abbildung 5.21: ZR PU - Holz, Reibwerte bei unterschiedlicher Belastung

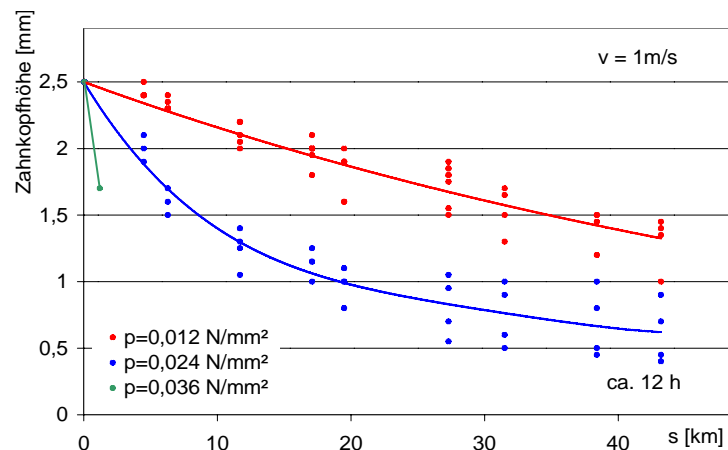


Abbildung 5.22: Verschleiß PU-Zahnriemen - Holz

Der Verschleiß in Form der Abnahme der Zahnkopfhöhe ist in Abbildung 5.22 dargestellt. Bei einer Flächenpressung von 0,036 N/mm<sup>2</sup> kommt es zu sehr hohen Verschleißraten durch Abrasivverschleiß, teilweise jedoch auch zu Anschmelzungen (Abbildung 5.23). Dieser Versuch wurde frühzeitig abgebrochen. Bei niedrigeren Flächenpressungen sind Zahnkopfhöhenverluste von bis zu 2 mm (0,024 N/mm<sup>2</sup>) bzw. 1,5 mm (0,012 N/mm<sup>2</sup>) zu verzeichnen. Der Verschleiß findet am Umfang nicht gleichmäßig statt, deshalb wurden mehrere Verschleißstellen am Umfang verteilt für die Messung herangezogen. Mit Einsetzen der Verschleißerscheinungen konnte eine starke Geräuschentwicklung festgestellt werden. Der Verschleißbeginn und die Verschleißintensität sind unabhängig vom PU-Werkstoff (PU-grün, PU-weiß).



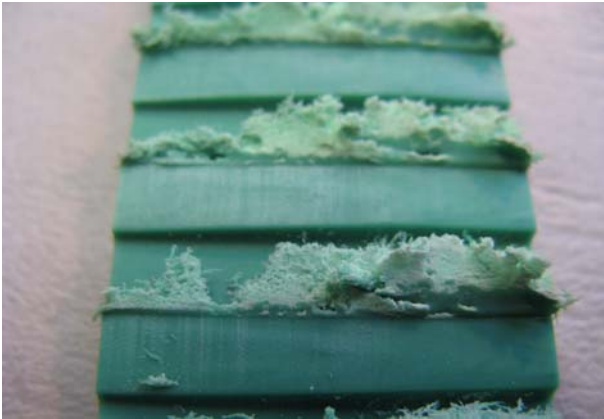


Abbildung 5.23: PU- Holz, 0,036 N/mm<sup>2</sup>, 1 m/s, 15 Min.



Abbildung 5.24: PU - Holz, 0,024 N/mm<sup>2</sup>, 1 m/s, 12 h

### PAZ-Zahnriemen - Schichtholz

Der Einlauf von beschichteten Zahnriemen an Gleitschienen erfolgt mit geringen Schwankungen der Reibwerte. Beginnend von  $\mu = 0,19$  ist ein leichter Anstieg auf Werte von 0,23 zu verzeichnen. Die Erwärmung der Wirkstelle um ca. 7,5 Kelvin ist nach 5 Stunden abgeschlossen (Abbildung 5.25).

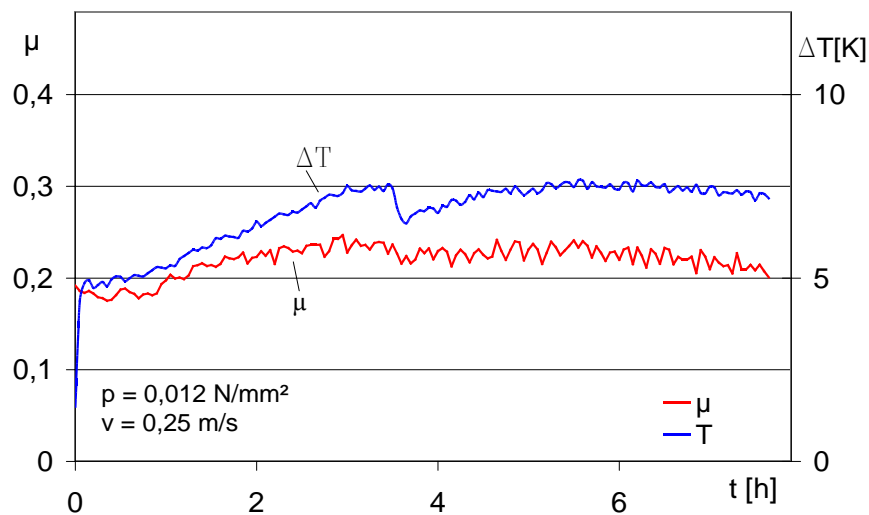


Abbildung 5.25: Einlauf ZR PAZ - Schichtholz

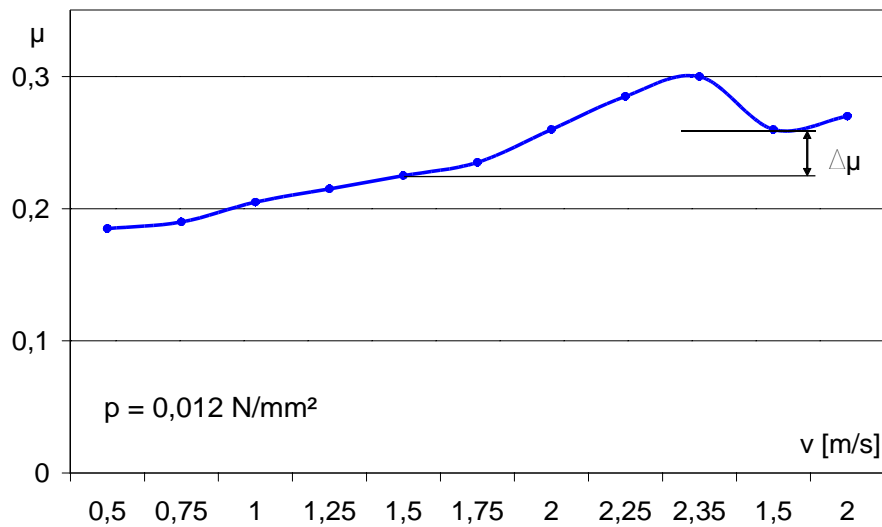


Abbildung 5.26: PAZ - Holz Geschwindigkeitssteigerungen

Der Reibwert der Paarung ist geschwindigkeitsabhängig. Wird das System mit konstanter Flächenpressung und steigenden Relativgeschwindigkeiten belastet, steigt auch der Reibwert. Bei sinkenden Geschwindigkeiten fällt ebenfalls der Reibwert, jedoch nicht auf das Niveau vor dem Geschwindigkeitsmaximum (Abbildung 5.26). Eine irreversible Änderung der tribologischen Paarung hat stattgefunden.

Eine Zusammenstellung von ca. 120 Versuchen mit Mittelwertbildung für gleiche Flächenpressung und Geschwindigkeit ist in Abbildung 5.27 und 5.28 dargestellt. Mit steigenden Geschwindigkeiten nehmen die Reibwerte zu. Mit dem Ansteigen der Flächenpressung sind fallende Reibwerte festzustellen (Abbildung 5.28).

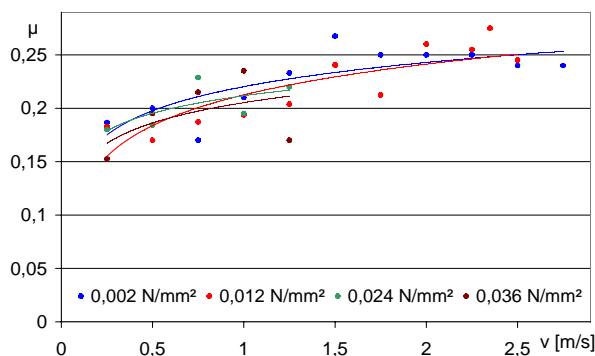


Abbildung 5.27: Reibwerte ZR PAZ - Holz

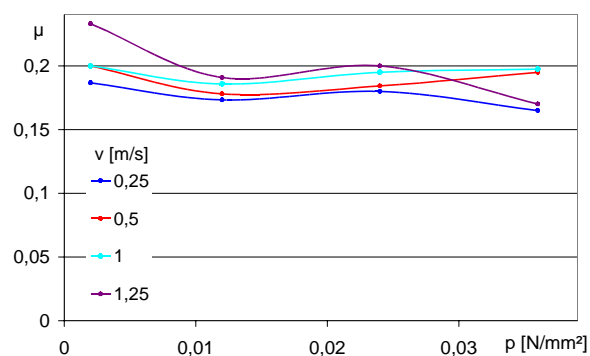


Abbildung 5.28: Reibwerte ZR PAZ - Holz

In Abbildung 5.29 sind die Reibwerte für Einzelversuche an PAZ -grau und PAZ-grün Zahnriemen mit PE-UHMW Stützschiene bei unterschiedlichen Pressungen und steigenden Gleitgeschwindigkeiten dargestellt. Der PAZ-grau Zahnriemen weist sowohl bei unterschiedlichen Flächenpressungen als auch Geschwindigkeiten höhere Reibwerte auf.

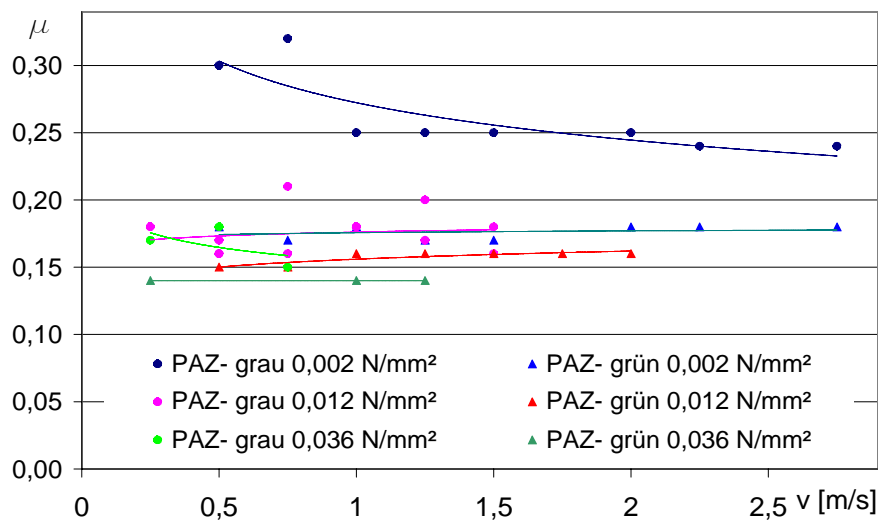


Abbildung 5.29: Reibwerte PAZ-Zahnriemen an Schichtholz, Einzelwerte

### 5.4.2.3 Stützschiene material Stahl

#### PU-Zahnriemen - Stahl

Für die Untersuchungen an Stahlgleitschienen wurden zwei verschiedene Bearbeitungsvarianten gewählt, um den Einfluss der Oberflächenrauheit zu ermitteln. Der Einlauf von Zahnriemen an geschliffenen Stahlschienen ( $R_z 6,3$ ) weist höhere Reibwerte auf. Diese sind verbunden mit starken Stick-Slip-Effekten. Die Reibwerte schwanken von  $\mu = 0,9$  bis 1,2 und erreichen nach ca. 4 Stunden einen stabilen Wert von  $\mu = 1,0$ . Das Ruckgleiten dieser Paarung ist mit erheblichen Geräuschentwicklungen verbunden.

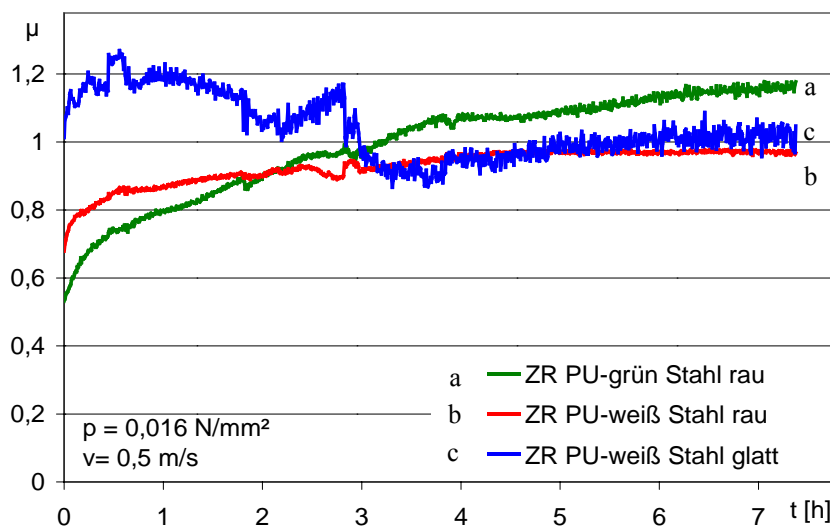


Abbildung 5.30: ZR PU - Stahl, Einlaufphase

Sind die Stahloberflächen überfräst und weisen eine Rauheit von  $R_z 25$  auf, so sind die Reibwerte beim Einlauf geringer als bei geschliffenen Oberflächen (Abbildung 5.30). Ursache für diesen

Unterschied ist die reale Kontaktfläche der Paarungen. Bei den rauen Oberflächen stellt sich ebenfalls noch eine Unterscheidung zwischen PU-grün und PU-weiß Zahnriemen dar. Der PU-grün Zahnriemen beginnt seinen Reibwertverlauf bei  $\mu = 0,55$  und erreicht nach ca. 7 Stunden Werte von  $\mu = 1,15$  mit steigender Tendenz. Der PU-weiß Zahnriemen durchläuft trotz seines höheren Startreibwertes von  $\mu = 0,7$  insgesamt nicht eine solche Steigerung und erreicht stabile Werte nach ca. 5 Stunden mit  $\mu = 0,95$ .

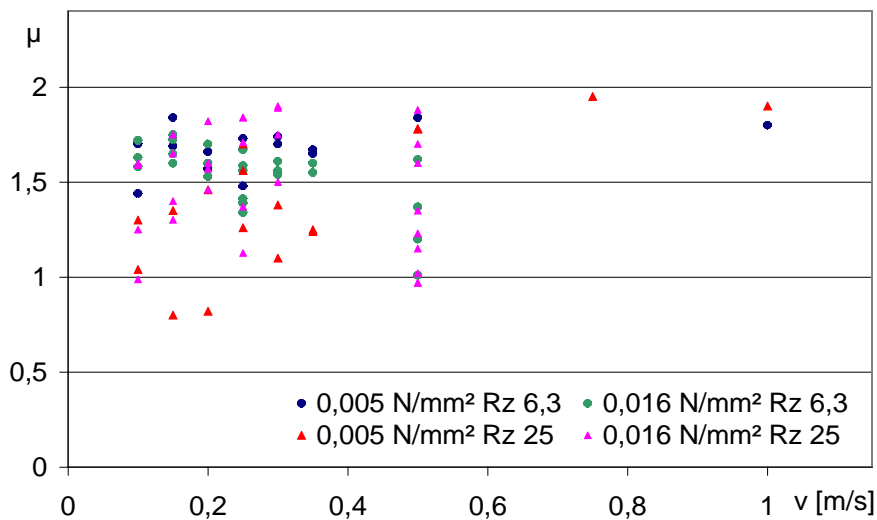


Abbildung 5.31: Reibwerte ZR PU – Stahl- Stützschiene

Die Darstellung aller Versuche von unbeschichteten Zahnriemen mit Stahlgleitschiene sind in Abbildung 5.31 dargestellt. Die Reibwerte bewegen sich in einem Bereich von  $\mu = 0,8$  bis  $\mu = 1,95$ .

Der Einsatz für entsprechende Anwendungen ist auf Grund der hohen Verlustleistung und der Geräuschemission nicht zweckmäßig. Die entstehenden Schwingungen wirken sich negativ auf die Anlagensicherheit aus.

## PAZ Zahnriemen – Stahl

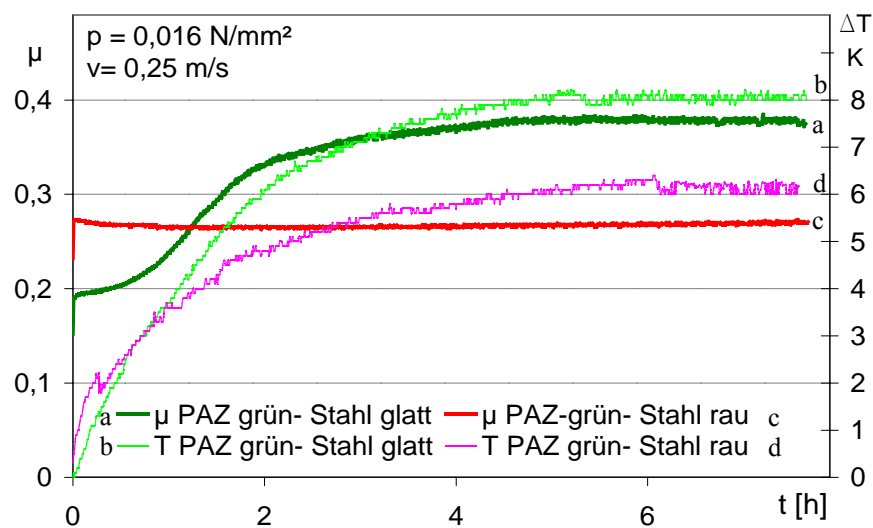


Abbildung 5.32: PAZ-ZR- Stahl, Einlaufverhalten unterschiedlicher Rauheiten

Die Untersuchungen von beschichteten Zahnriemen mit Stahlgleitschienen unter gleichen Bedingungen zeigten niedrigere Reibwerte bei Stahlgleitschienen sowohl bei geschliffener als auch bei gefräster Oberfläche als an unbeschichteten Zahnriemen. Der Reibwert in Verbindung mit glatter Oberfläche ( $R_z$  6,3) beginnend bei  $\mu = 0,2$  steigt innerhalb von 4 Stunden auf Werte von  $\mu = 0,38$ . Die Kontakttemperaturerhöhung ist ebenfalls nach diesem Zeitraum abgeschlossen und erreicht Werte von ca. 8 Kelvin. Ein deutlicher Einlauf der rauhen Stahloberfläche ( $R_z$  25) ist nicht feststellbar. Der Startreibwert von  $\mu = 0,28$  wird innerhalb der 8-stündigen Versuchsdauer nicht verändert. Die Kontakttemperatur dieser Paarung erhöht sich um 6 Kelvin.

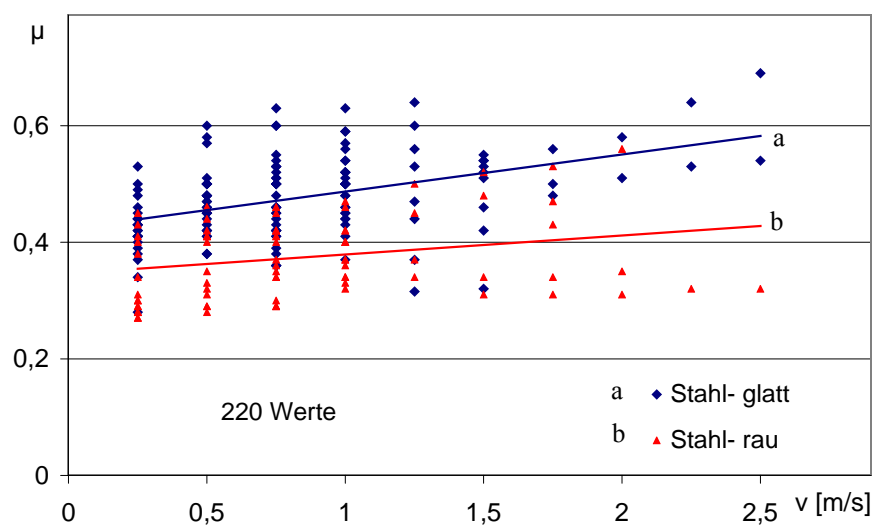


Abbildung 5.33: Reibwerte PAZ-ZR - Stahl, rau- glatt, tendenzieller Vergleich

Die Tendenz von höheren Reibwerten bei glatten Oberflächen ist bei allen durchgeführten Versuchen festzustellen (Abbildung 5.33). Messreihen mit unterschiedlichen Rauheiten bei mehreren Flächenpressungsstufen und steigenden Geschwindigkeiten sind in Abbildung 5.34 dargestellt. Die Reibwerte sind geschwindigkeitsabhängig. Geringe Reibwerte bei niedrigen Geschwindigkeiten und bei rauen Oberflächen mit geringeren Anstiegen sind deutlich ausgeprägt.

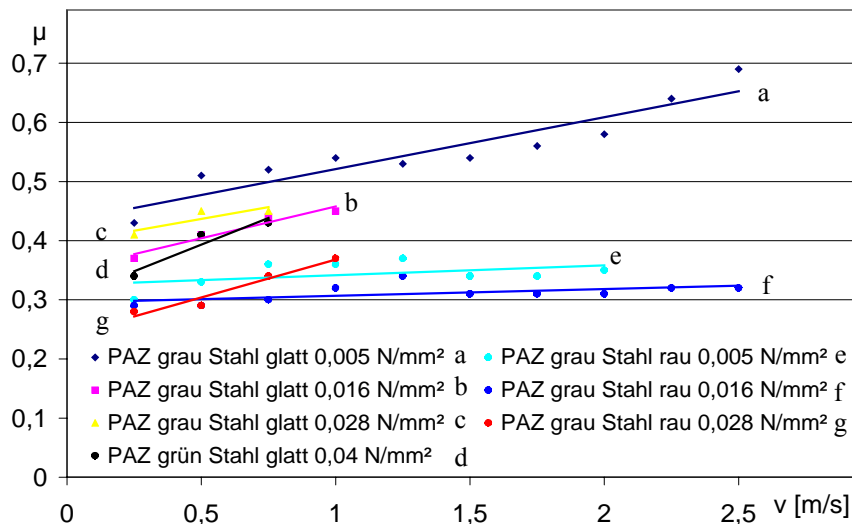


Abbildung 5.34: Stahlgleitschiene gegen PAZ-Zahnriemen, unterschiedliche Pressungen und Rauheiten

#### 5.4.2.4 Stützschiene material Polyethylen UHMW

##### PU-Zahnriemen - PE UHMW

Auf Grund seiner guten Verarbeitbarkeit, seiner Verfügbarkeit und seines geringen Preises bei niedrigen Reibwerten und hoher Verschleißfestigkeit wird Polyethylen häufig in Gleitpaarungen eingesetzt.

Das Einlaufverhalten eines unbeschichteten Polyurethan-Zahnriemens mit einer Stützschiene aus Polyethylen UHMW ist in Abbildung 5.35 dargestellt. Bei einer Geschwindigkeit von 0,25 m/s wurde eine projizierte Flächenpressung von 0,012 N/mm<sup>2</sup> aufgebracht. Die Reibwerte, beginnend bei  $\mu = 0,47$ , schwanken in einem Band zwischen  $\mu = 0,35$  und  $\mu = 0,55$  mit leicht fallender Tendenz. Der Mittelwert der Reibwerte über die gesamte Versuchsdauer weist einen Wert von  $\mu = 0,44$  auf. Die Kontakttemperatur erhöht sich in den ersten 30 Minuten auf ihr Maximum um 18 Kelvin und fällt dann leicht, mit sinkenden Reibwerten und damit eingebrachter Reibleistung ab.

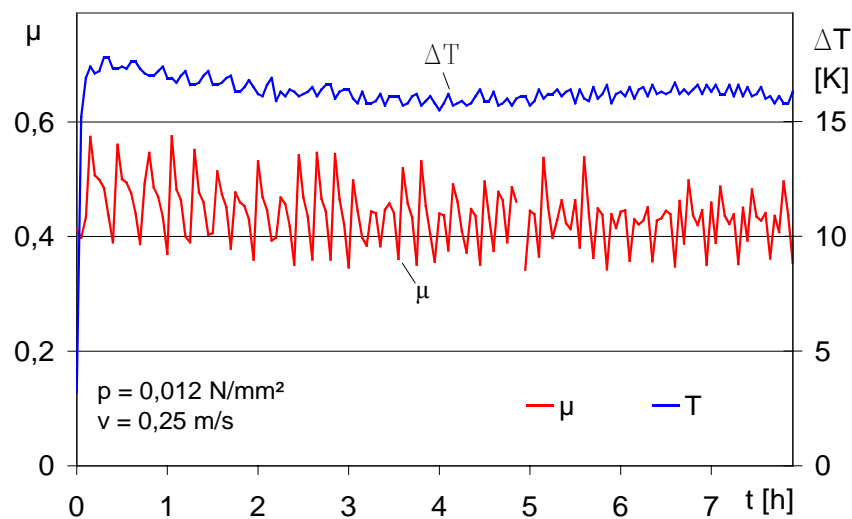


Abbildung 5.35: Einlaufverhalten ZR PU - PE-UHMW

Bei weiteren Versuchen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und einer weiteren Pressung von  $0,002 \text{ N/mm}^2$  konnten Reibwerte im Bereich von  $\mu = 0,5$  mit steigender Tendenz bei höheren Geschwindigkeiten festgestellt werden. Die niedrigsten gemessenen Werte liegen bei  $\mu = 0,28$ . Die maximale Streuung der Reibwerte bei Versuchen unter gleichen Versuchsbedingungen zeigte Reibwerte von  $\mu = 0,28$  bis  $\mu = 0,62$ .

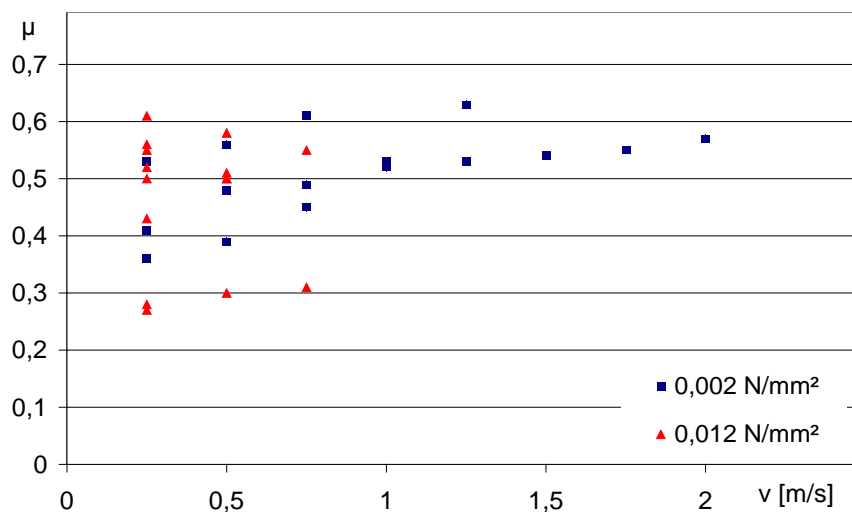


Abbildung 5.36: Reibwerte ZR PU - PE-UHMW

Die Versuche wurden mit Flächenpressungen von  $0,002 \text{ N/mm}^2$  und  $0,012 \text{ N/mm}^2$  und steigenden Geschwindigkeiten bis zum Eintreten von stabilen Reib- und Temperaturwerten durchgeführt. Die jeweils höchste Geschwindigkeitsstufe führt zur thermischen Zerstörung der Gleitfläche durch Aufschmelzen.

## PAZ-Zahnriemen – PE-UHMW

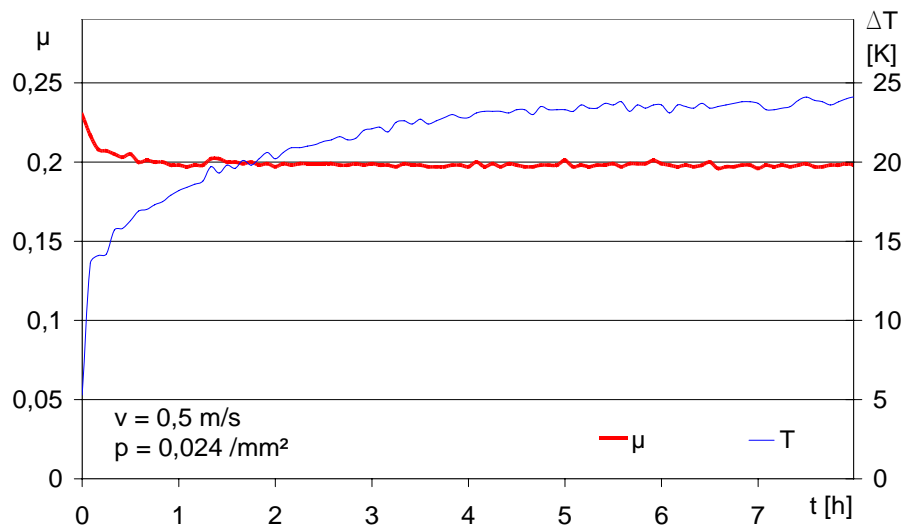


Abbildung 5.37: Einlauf PE-UHMW - PAZ grau

Bei der Bewegung von Zahnriemen mit Polyamidgewebe über eine PE-UHMW Gleitschiene ist der Reibungswiderstand über dem gesamten Einlaufzeitraum deutlich geringer als bei Zahnriemen ohne Gewebebeschichtung. Das unmittelbare Einlaufen selbst findet innerhalb weniger Minuten mit Reibwerten von ca.  $\mu = 0,25$  sehr schnell fallend auf Reibwerte von  $\mu = 0,2$  statt. Die Schwankungen um den Reibwert von  $\mu = 0,2$  sind sehr gering. Innerhalb der ersten Stunden Versuchsdauer kommt es zu keinen weiteren Reibwertänderungen. Die Kontakttemperatur erhöht sich innerhalb von ca. 6 Stunden um 24 Kelvin. Verschleiß ist weder am Zahnriemen noch an der Gleitschiene feststellbar.

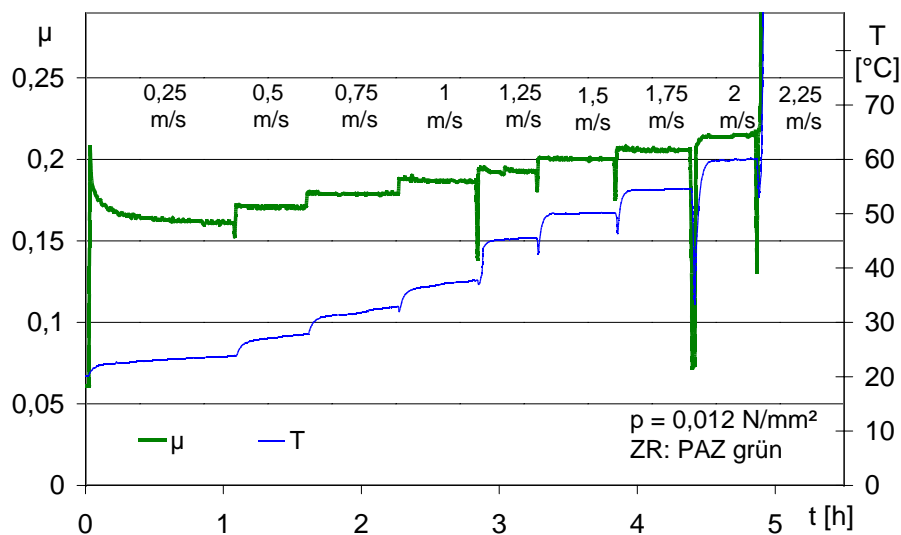


Abbildung 5.38: Geschwindigkeitssteigerung an Paarung PE-UHMW – PAZ-grün



Mit steigenden Geschwindigkeiten erhöhen sich die Reibwerte der Paarungen. In Abbildung 5.38 ist ein kontinuierlicher Versuch mit steigenden Geschwindigkeiten und konstanter Flächenpressung zu sehen. Die Geschwindigkeit, beginnend mit 0,25 m/s, wurde in Stufen von 0,25 m/s erhöht, wenn ein relativ stabiler Zustand der Reibwerte und eine gleichmäßige Erwärmung der Gleitpaarung abgeschlossen war. Die Erhöhung der Kontakttemperatur auf Grund der gestiegenen Reibleistung (Erhöhung von Geschwindigkeit und Reibwert) findet bis zu einer Höhe von ca. 60 ° Celsius statt. Wird die Geschwindigkeit weiter erhöht, kommt es zu einer Aufschmelzung der Gleitschiene und einer weiteren starken Reibwerterhöhung mit folgendem Totalausfall des Systems. Eine Grenztemperatur von 60 ° Celsius konnte in weiteren Versuchen bestätigt werden.



Abbildung 5.39: Aufgeschmolzene PA-Beschichtung

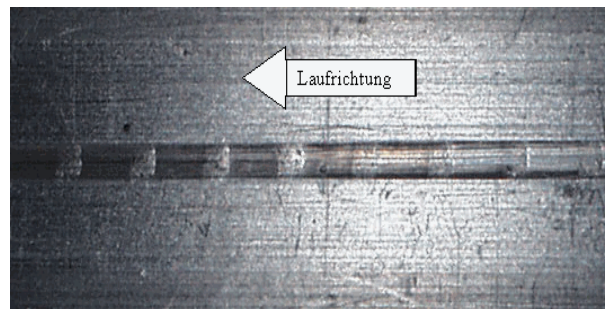


Abbildung 5.40: Thermisch zerstörte Gleitschiene

Die Ergebnisse der Reibwertuntersuchungen aus Einzelversuchen ist in Abbildung 5.42 dargestellt. In den jeweiligen Pressungsstufen ist mit steigender Geschwindigkeit eine Steigerung des Reibwertes messbar. Ein Minimum der Reibwerte ist bei einer Flächenpressung von 0,012 N/mm<sup>2</sup>, unabhängig von der Geschwindigkeit festzustellen.

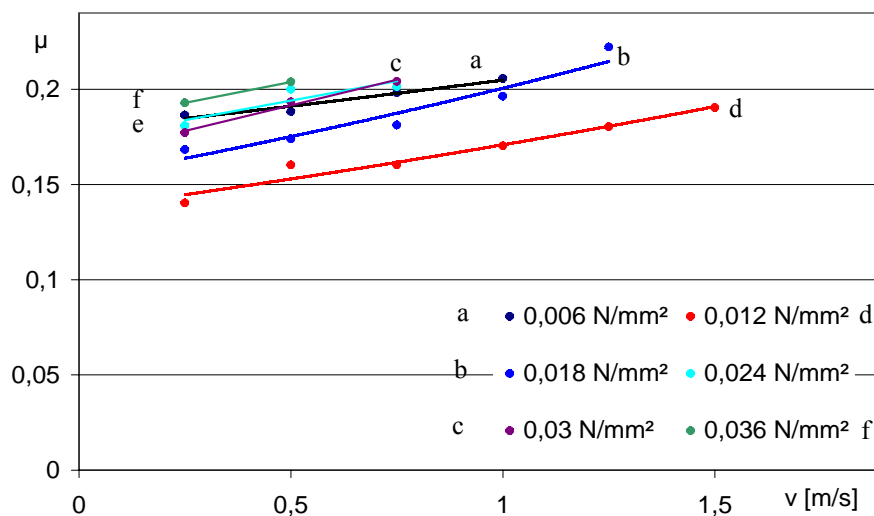


Abbildung 5.41: Einzelversuche PE-UHMW – PAZ

Die Auswertung aller durchgeführten Versuche der mit Polyamidgewebe beschichteten Zahnriemen in Verbindung mit Stützschiene aus Polyethylen UHMW ist in Abbildung 5.42 und 5.43 dargestellt. Für die Versuchsreihen sind ca. 330 Einzelmessungen durchgeführt worden. Die Streuung für mehrfach unter gleichen Bedingungen durchgeführte Versuche ist sehr gering, deshalb wurden für die Darstellung Mittelwerte für mehrere Versuche gebildet. Die Tendenz von steigenden Reibwerten bei steigenden Geschwindigkeiten und steigenden Pressungen ist bei allen Untersuchungen feststellbar.

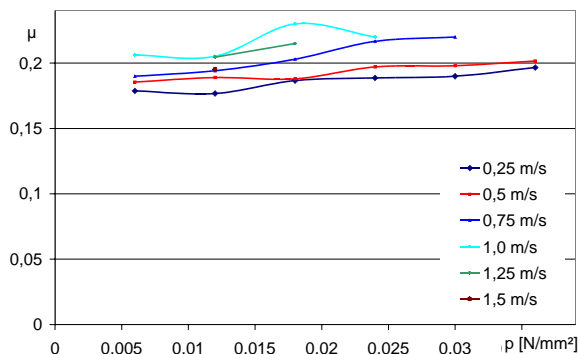


Abbildung 5.42: Reibwerte ZR PAZ - PE-UHMW

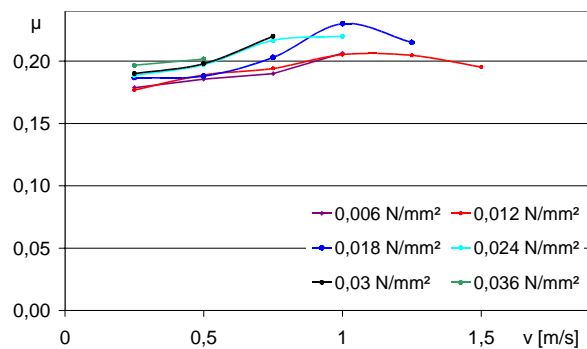


Abbildung 5.43: Reibwerte ZR PAZ - PE-UHMW

#### 5.4.2.5 Stützschiene material PTFE

PTFE weist mit vielen Gleitpartnern günstige Reibwerte auf und wurde deshalb als Vergleichsmaterial in die Untersuchungen einbezogen. Das Einlaufen bei einer Geschwindigkeit von 0,25 m/s verläuft je nach Zahnriemen unterschiedlich. In Verbindung mit unbeschichtetem Polyurethan steigt der Reibwert von  $\mu = 0,25$  auf Werte von  $\mu = 0,38$  innerhalb weniger Minuten an. Im Anschluss an dieses Reibwertmaximum sinkt der Reibwert auf  $\mu = 0,3$ . Der Reibwertverlauf bei polyamidbeschichteten Zahnriemen verhält sich gegensätzlich. Mit Reibwerten von  $\mu = 0,15$  beginnend fällt dieser leicht auf Werte von  $\mu = 0,11$  ab, um nach Durchschreiten dieses Minimums auf Werte von  $\mu = 0,18$  anzusteigen (Abbildung 5.44). Die sich einstellenden Reibwerte sind bei beschichteten als auch unbeschichteten Zahnriemen nach diesem Einlauf sehr stabil.

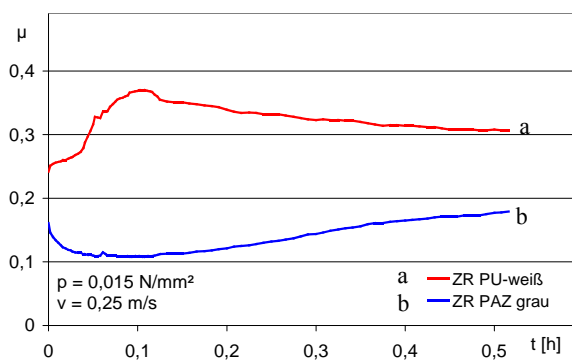


Abbildung 5.44: Einlaufphase PTFE

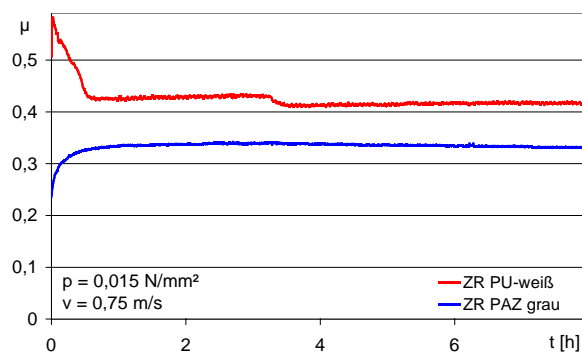


Abbildung 5.45: Reibwertverlauf PTFE

Werden die Untersuchungen mit den eingelaufenen Riemen bei höher Geschwindigkeit (0,75 m/s) fortgeführt, stellen sich nach einer sehr kurzen Einlaufphase wiederum stabile Reibwerte ein. Die Reibwerthöhe ist abhängig von der Riemengeschwindigkeit und steigt mit dieser an (Abbildung 5.45).

Die Gleitpaarung wird von sehr starken Verschleißerscheinungen an der PTFE-Schiene begleitet. Der lineare Verschleißbetrag nach einer 25-stündigen Laufzeit betrug 0,5 mm (beschichtete Zahnriemen). Der Einsatz von reinen PTFE-Gleitschienen in Zahnriemenförderern ist auf Grund der hohen Verschleißraten nicht wirtschaftlich möglich. Eine Beimischung von PTFE als Gleitzusatz in anderen Kunststoffen wird bei anderen technischen Anwendungen realisiert und sollte in weiterführenden Untersuchungen an Zahnriemen untersucht werden.



Abbildung 5.46: PTFE-Partikel an Zahnriemengewebe

### 5.4.2.6 Stützschienenmaterial PA 6 G

Auf Grund der eingelagerten Öl- und Festschmierstoffe in der Struktur des Polyamids und seines breiten Anwendungsfeldes als Gleitwerkstoff wurde Polyamid-6 Guss Öl in die Untersuchungen als Vergleichsmaterial mit PA beschichteten Riemen einbezogen.

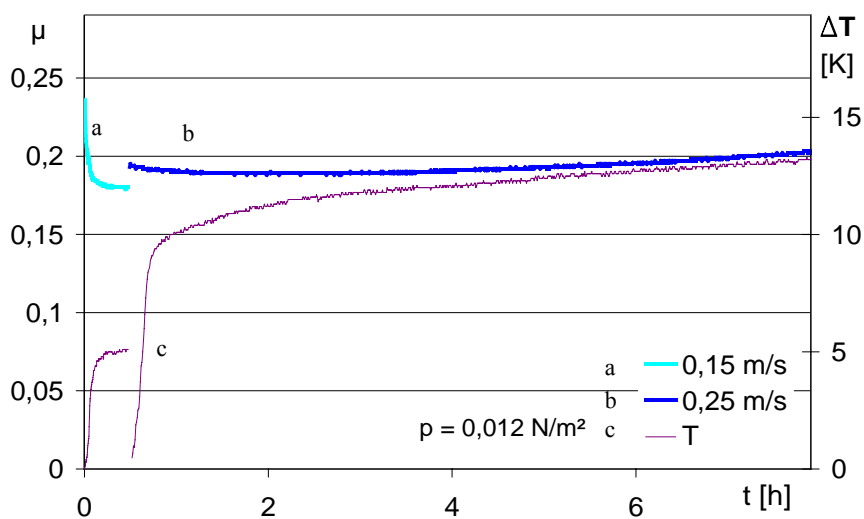


Abbildung 5.47: PA 6G + Öl Zahnriemen PAZ grau

Die Kurzzeituntersuchungen wurden bei einer Flächenpressung von  $0,012 \text{ N/mm}^2$  und einer Geschwindigkeit von  $0,15 \text{ m/s}$  gestartet und nach ca. 30 Minuten auf die Geschwindigkeit  $0,25 \text{ m/s}$  erhöht. In den ersten 30 Minuten fiel der Reibwert von  $\mu = 0,24$  auf  $\mu = 0,18$ , was dem bei anderen Paarungen beobachteten Einlaufverhalten entspricht. Die Erhöhung der Geschwindigkeit führte zu einem Reibwertsprung auf  $\mu = 0,19$  und steigender Tendenz auf  $\mu = 0,21$  innerhalb der ersten 8 Stunden.

Die Kontakttemperatur steigt innerhalb der ersten 30 Minuten um ca. 5 Kelvin an. Nach der Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit steigt die Temperatur an der Kontaktfläche deutlich an. Sie erreicht nach 8 Stunden einen Erhöhung von 13 Grad bei steigender Tendenz, da mit steigendem Reibwert die zugeführte Reibleistung steigt.

### 5.4.3 Langzeituntersuchungen

Für die Dimensionierung von Zahnriemenförderereinrichtungen sind Erkenntnisse bedeutsam, wie sich die Reibungswiderstände zwischen Stützschiene und Zahnriemen bei Dauerbelastung verhalten. Auf Grund der Ergebnisse der Kurzzeituntersuchungen sind unbeschichtete Zahnriemen nicht bzw. nur für untergeordnete Einsatzzwecke im kurzzeitigen Betrieb für Förderaufgaben geeignet. Die hohen Reibungszahlen oder Verschleißraten erlauben keinen wirtschaftlichen Betrieb dieser Zugmittel. PTFE als Stützschiennenmaterial ist auf Grund seiner hohen Verschleißraten ebenfalls nicht als Gleitunterstützung geeignet. Die Dauerversuche wurden deshalb an gewebebeschichteten Zahnriemen in Verbindung mit ausgewählten Stützschiennenmaterialien durchgeführt.

Tabelle 5.2: Langzeitversuche

Paarung	Geschwindigkeit	Flächenpressung	Rauheit	Dauer
Stützschiene: Schichtholz ZR: PAZ	0,5 m/s	0,012 N/mm <sup>2</sup>		75 d
	0,5 m/s	0,024 N/mm <sup>2</sup>		
	1,0 m/s	0,012 N/mm <sup>2</sup>		
	1,0 m/s	0,012 N/mm <sup>2</sup>		
	1,25 m/s	0,015 N/mm <sup>2</sup>		19 d
Stützschiene: Schichtholz teflongetränkt, ZR: PAZ	1,5 m/s	0,012 N/mm <sup>2</sup>		95 d
	1,5 m/s	0,024 N/mm <sup>2</sup>		95 d
Stützschiene: Stahl ZR: PAZ	0,5 m/s	0,016 N/mm <sup>2</sup>	Rz 25	75 d
	1,25 m/s	0,016 N/mm <sup>2</sup>	Rz 6,3	65 d
	1,5 m/s	0,016 N/mm <sup>2</sup>	Rz 25	20 d
Stützschiene: PE-UHMW ZR: PAZ	0,25 m/s	0,007 N/mm <sup>2</sup>		34 d
	0,25 m/s	0,012 N/mm <sup>2</sup>		30 d
	0,5 m/s	0,007 N/mm <sup>2</sup>		160 d
	0,5 m/s	0,024 N/mm <sup>2</sup>		149 d
	0,75 m/s	0,007 N/mm <sup>2</sup>		49 d
	0,75 m/s	0,012 N/mm <sup>2</sup>		8 d
	0,75 m/s	0,012 N/mm <sup>2</sup>		98 d
	0,75 m/s	0,024 N/mm <sup>2</sup>		49 d
	1,0 m/s	0,007 N/mm <sup>2</sup>		70 d
	1,0 m/s	0,012 N/mm <sup>2</sup>		70 d
	1,0 m/s	0,012 N/mm <sup>2</sup>		70 d
Stützschiene: Aluminium ZR: PAZ	1,0 m/s	0,013 N/mm <sup>2</sup>	Rz 4	4 d
	1,0 m/s	0,013 N/mm <sup>2</sup>	Rz 25	75 d
	1,0 m/s	0,013 N/mm <sup>2</sup>	Rz 25	85 d
Stützschiene: PA6 G Öl ZR: PAZ	0,5 m/s	0,012 N/mm <sup>2</sup>		22 d

#### 5.4.3.1 PAZ-Zahnriemen - Schichtholzgleitschienen

Die Reibwertverläufe für PAZ-Zahnriemen im Dauerkontakt mit Schichtholzgleitschienen ist in Abbildung 5.48 dargestellt. Bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten (0,5 m/s) stellt sich unabhängig von der Flächenpressung ein Reibwert zwischen 0,45 und 0,6 während der ersten 45 Tage ein. Danach beginnt bei der Paarung mit der höheren Flächenpressung (0,024 N/mm<sup>2</sup>) ein stetiger Anstieg auf Werte von  $\mu = 0,7$ , einhergehend mit einem Verschleiß der Gewebeschicht. Die Paarung mit der niedrigeren Flächenpressung (0,012 N/mm<sup>2</sup>) ändert ihr Reibwertverhalten nur geringfügig. Die Versuche in dieser Geschwindigkeitsstufe (0,5 m/s) wurden nach ca. 75 Tagen (3200 km Gleitweg) beendet. Eine polymere Ablagerung an der Stützschiene ist zu beobachten.

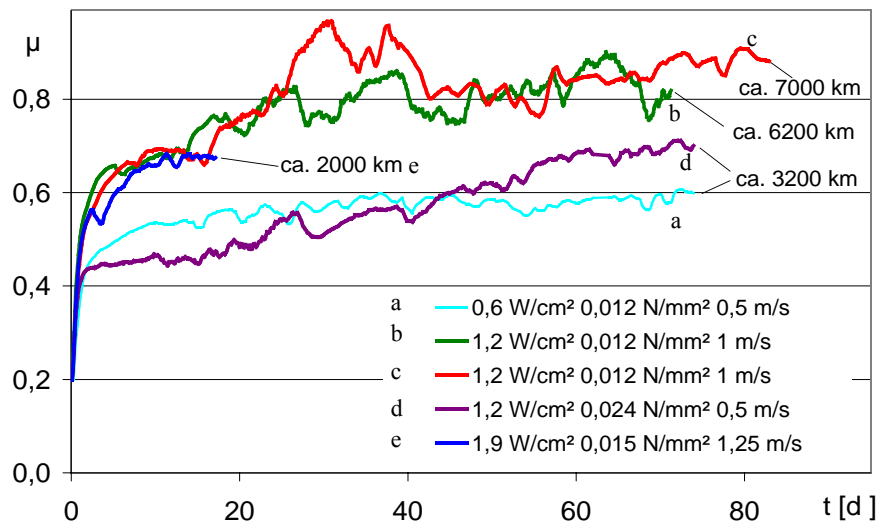


Abbildung 5.48: PAZ-ZR - Schichtholz, Dauerversuche

Bei höheren Gleitgeschwindigkeiten (1,0 bzw. 1,25 m/s) strebt der Reibwert nach einer Einlaufphase von ca. 3 Tagen einen Reibwert von  $\mu = 0,7$  an.

Nach ca. 15 bzw. 18 Tagen erfolgt ein weiterer Anstieg auf Werte über 0,8 bzw. von  $\mu = 0,95$  nach 25 Tagen (1 m/s; 0,012 N/mm²). Im weiteren Verlauf der Beanspruchung sinken bei beiden Paarungen die Reibwerte nicht mehr unter  $\mu = 0,75$  ab. Erste Verschleißerscheinungen mit Einlagerung von Partikeln aus der Gleitschiene zeigen sich an dieser Probe bereits nach 15 Tagen (Abbildung 5.49). Teilweise Ablösungen vom Gewebe sind nach 25 Tagen feststellbar und ein unmittelbarer Kontakt zwischen Polyurethanmatrix und Holzgleitschiene kommt zustande (Abbildung 5.50). Die maximale Versuchsdauer betrug ca. 83 Tage (7000 km Gleitweg) und endete mit einem vollständigen Verschleiß der Gewebeschicht. Auffällig sind die deutlichen Schwankungen der Reibwerte und der unterschiedliche Verlauf der Reibwerte bei gleichen Belastungsbedingungen nach einem Ausbilden der Transferschicht und einer deutlichen Schädigung des Gewebes (ca. 25 Tage).

Bemerkenswert ist das unterschiedliche Verhalten der Proben mit gleichem pv-Wert. Die Paarung mit der höheren Gleitgeschwindigkeit weist über den gesamten Versuchszeitraum einen höheren Reibwert und einen schnelleren Verschleiß der Gewebeschicht auf.



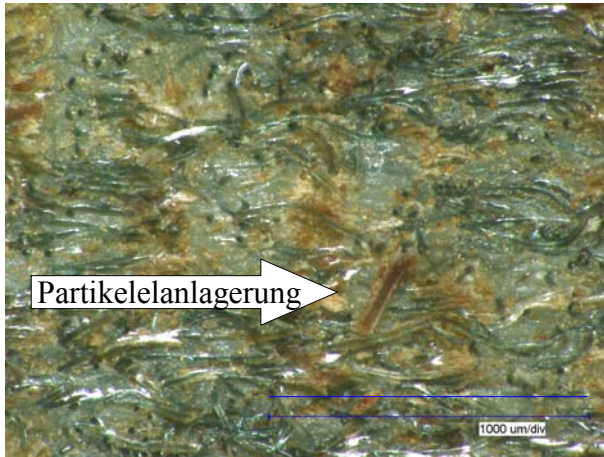


Abbildung 5.49: PAZ Holz Partikeleinlagerungen



Abbildung 5.50: Gewebeverschleiß

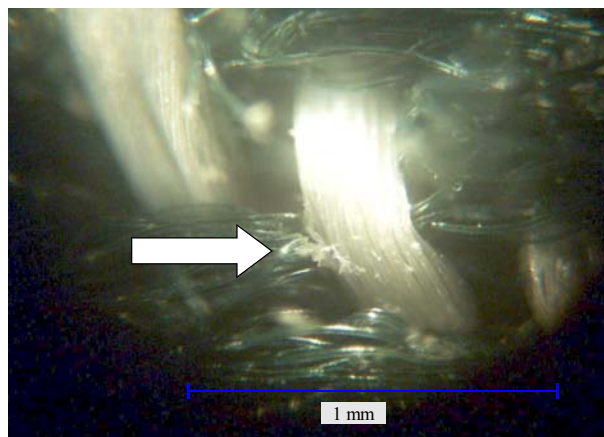


Abbildung 5.51: Faseraufspaltung

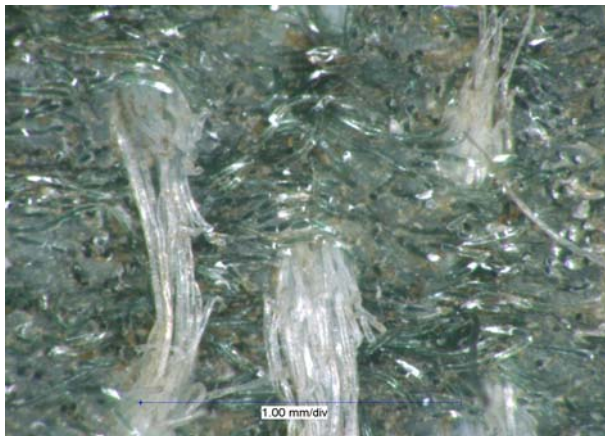


Abbildung 5.52: Faserrisse

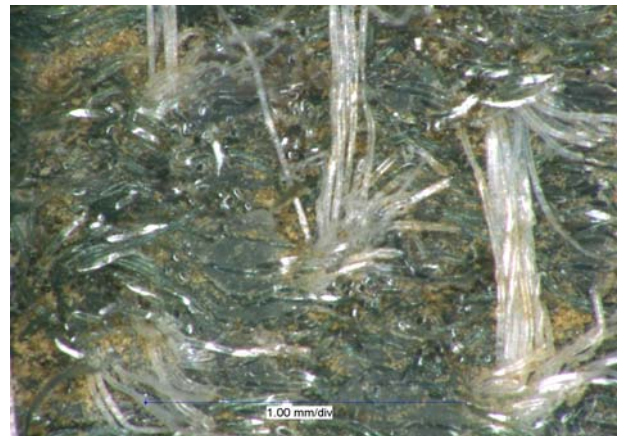


Abbildung 5.53: Faserbündelriss

Verschleißerscheinungen zeigen sich durch Aufspaltung einzelner Fasern (Abbildung 5.51), Faserrisse (Abbildung 5.52) und Faserbündelrisse (Abbildung 5.38) als Vorstufen zum Gewebeabtrag.

### PAZ-Zahnriemen – Schichtholzgleitschienen- PTFE-Partikel

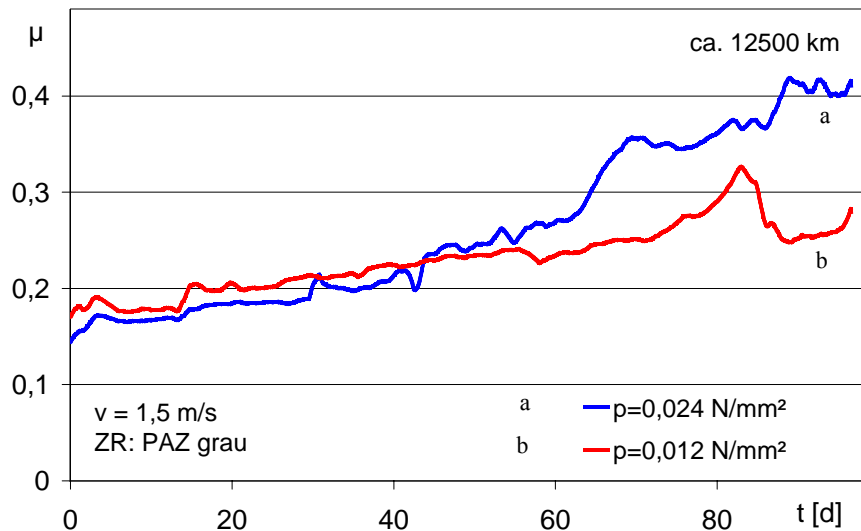


Abbildung 5.54: Holzgleitschiene mit PTFE-Partikel gegen ZR PAZ

Um die Wirksamkeit einer Einmalschmierung zu untersuchen, wurden zwei Holzproben mit einer Emulsion aus PTFE-Partikeln und einer Trägerflüssigkeit getränkt. Bei einer Geschwindigkeit von 1,5 m/s stellen sich über einen langen Zeitraum niedrige Reibwerte ein. Die Paarung mit einer projizierten Flächenpressung von 0,012 N/mm<sup>2</sup> beginnt mit einem Reibwert von  $\mu = 0,18$  und steigt auf einen Wert von  $\mu = 0,25$  nach ca. 70 Tagen. Nach einem kurzen Maximum von  $\mu = 0,33$  sinken die Werte wieder auf  $\mu = 0,27$  ab (Abbildung 5.54).

Die Gleitpaarung mit der höheren Flächenpressung ( $p = 0,024$  N/mm<sup>2</sup>) beginnt ihren Verlauf mit Werten von  $\mu = 0,17$  um mit einem fast gleichen Anstieg innerhalb von 90 Tagen auf Werte von  $\mu = 0,42$  anzusteigen.

Beide Versuche wurden nach 95 Tagen (12500 km) beendet. Während der gesamten Versuchsdauer erfolgte keine Nachschmierung der Gleitpaarungen. An den Zahnköpfen der Zahnriemen beider Paarungen konnten deutliche Verschleißerscheinungen des Gewebes festgestellt werden.

Der positive Effekt der Einmalschmierung mit Silikonöl an Zahnriemen in Antriebssystemen wurde schon in [NEN99] beschrieben. Eine geringe Menge Schmierstoff ist in der Lage, den tribologischen Einlaufprozess günstig zu beeinflussen und den Reibwert langfristig abzusenken.

#### 5.4.3.2 PAZ-Zahnriemen - Stahlgleitschienen

Der Verlauf der Reibwerte im Dauerversuch an Stahlgleitschienen in Verbindung von PA-beschichteten Zahnriemen ist in Abbildung 5.55 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich der Reibwert nach ca. 24 Stunden auf Werte um  $\mu = 0,5$  einstellt und auf diesem Niveau ca. 10 Tage verharrt.



Dieses etwa gleiche Reibwertverhalten ist unabhängig von der Gleitgeschwindigkeit ( $v = 0,5 \dots 1,5$  m/s) und der Oberflächenrauheit (Rz 6,3; Rz 25). Die Unabhängigkeit der Reibwerthöhe von der Rauheit spiegelt nicht die Ergebnisse der Kurzzeitversuche mit tendenziell niedrigeren Werten bei raueren Oberflächen wieder. Dieses Verhalten begründet sich mit der Ausbildung einer Polymerschicht auf der Stahlstützschiene (Abbildungen 5.56, 5.57) sowohl bei der geschliffenen als auch bei der gefrästen Variante. Die Transferschicht wird teilweise durch Riefenbildung aufgerissen.

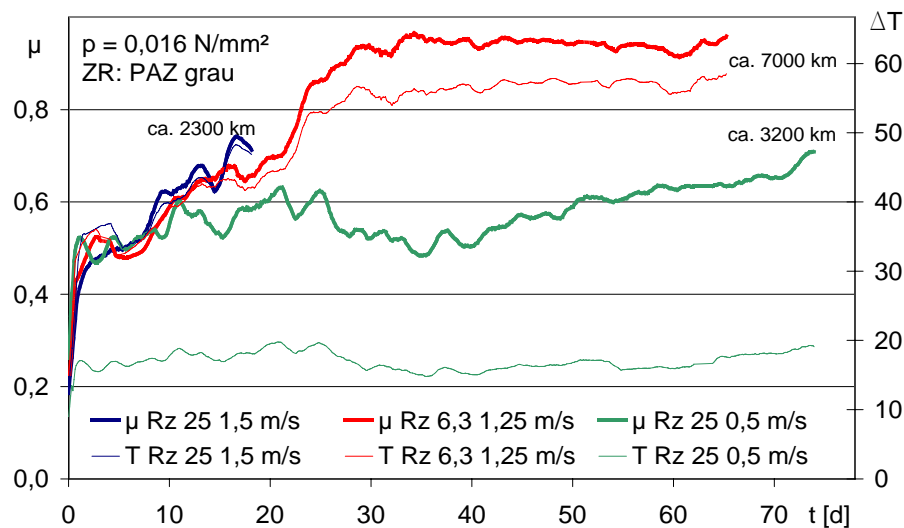


Abbildung 5.55: Stahl - PAZ-Zahnriemen, Langzeituntersuchung

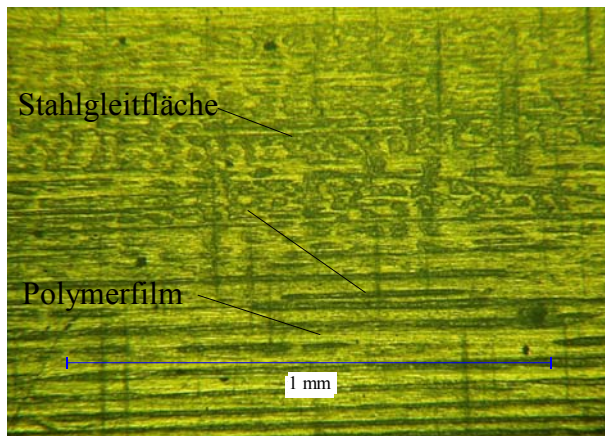


Abbildung 5.56: Stahlgleitfläche Rz 6,3 mit Polymerschicht

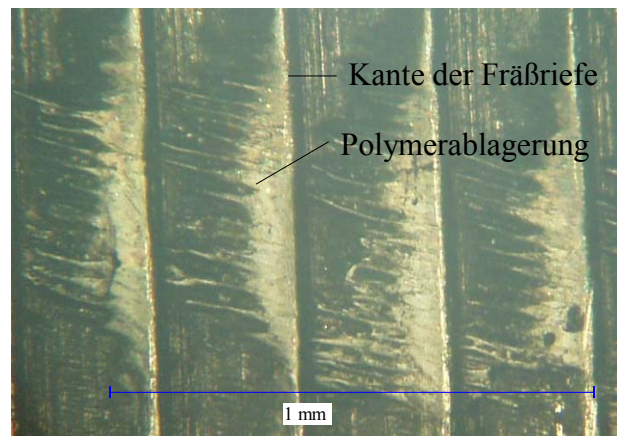


Abbildung 5.57: Polymerablagerungen in Fräßriefen von Stahlgleitfläche Rz 25

Nach dieser ersten Phase beginnt der Reibwert sowohl bei der Stützschiene mit Rz 25 Oberfläche ( $v = 1,5$  m/s) als auch mit Rz 6,3 ( $v = 1,25$  m/s) kontinuierlich zu steigen. Bei der rauen Gleit- schiene wurde der Versuch mit Reibwerten von  $\mu = 0,75$  nach ca. 20 Tagen und einer Lauflänge von 2300 Kilometern abgebrochen.

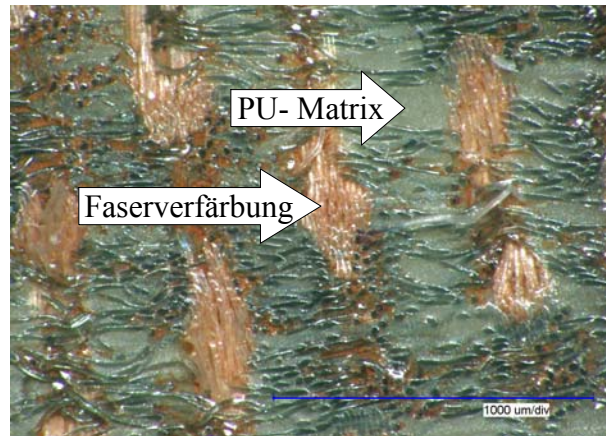


Abbildung 5.58: Stahl Rz 6,3 verschlissenes PA-Gewebe mit Faserverfärbungen

Die geschliffene Probe erreicht ihren maximalen Reibwert nach ca. 30 Tagen bei einem Wert von  $\mu = 0,95$ . Eine Fortführung des Versuches bis zu einer Dauer von ca. 65 Tagen (ca. 7000 km) brachte keine weiteren Änderungen in Reibwert und Kontakttemperatur. Das Gewebe des Zahnriemens ist stark geschädigt, die in der PU-Matrix eingebetteten Fasern sind im wesentlichen noch erhalten (Abbildung 5.58), überstehende Gewebeanteile sind abgetragen. Eine Verfärbung der Fasern deutet auf Tribooxidation hin.

Der Versuch mit einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s und einer Oberflächenrauheit von Rz 25 änderte seine Reibwerte nach ca. 10 Tagen auf Werte von  $\mu = 0,6$ , um nach dem Durchlaufen eines Minimums von  $\mu = 0,5$  auf Werte von  $\mu = 0,7$  anzusteigen. Dieser Wert wird nach 3200 Kilometern (ca. 75 Tage) erreicht. Die Gewebeschicht an den Zahnriemenköpfen ist vollständig verschlissen (Abbildung 5.60), Verschleißpartikel lagern sich im Gewebe zwischen den Zähnen ab. Der Polymerfilm auf der Stahlprobe ist fast vollständig geschlossen (Abbildung 5.61). Es konnten keine Tribooxidationsprodukte festgestellt werden.

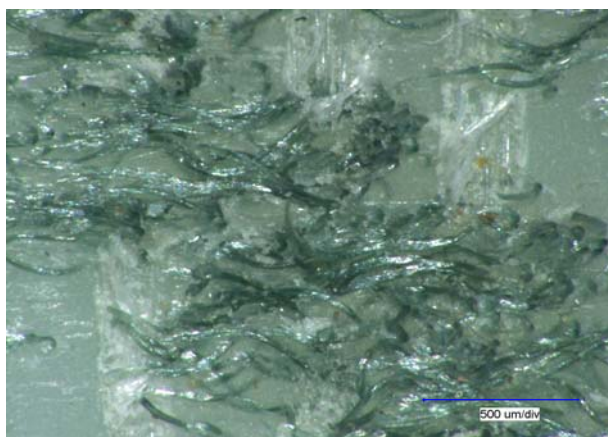


Abbildung 5.59: Stahl Rz 25, 0,5 m/s, 0,016 N/mm<sup>2</sup>, verschlissenes PA-Gewebe nach ca. 50 Tagen

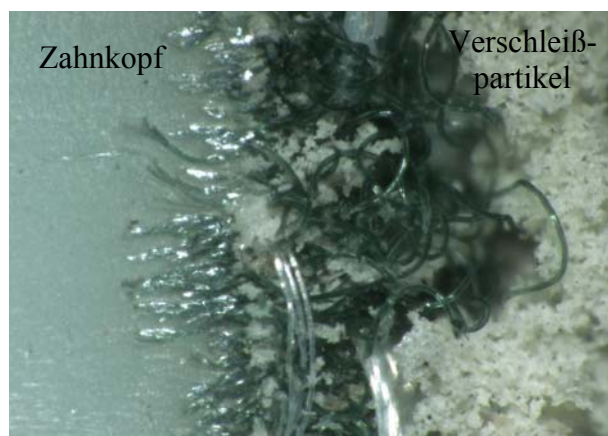
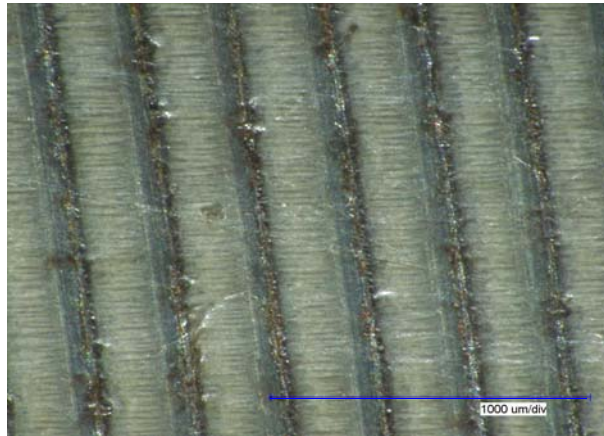


Abbildung 5.60: Stahl Rz 25, 0,5 m/s, 0,016 N/mm<sup>2</sup>, vollständig verschlissenes PA-Gewebe am Zahnkopf, 75 Tage



*Abbildung 5.61: fast vollständig geschlossener Polymerfilm auf Stahlprobe Rz 25*

Eine längere Versuchsdauer lässt keine weitere Veränderung an den Reibwerten erwarten, da die Polyurethanzahnköpfe auf einer vollständig geschlossenen Transferschicht aus Polymer gleiten.

### **5.4.3.3 PAZ-Zahnriemen – PE-UHMW-Gleitschienen**

Die Paarung PA-beschichteter Riemen gegen Gleitschienen aus PE-UHMW wurde bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Flächenpressungen untersucht. Dabei ergibt sich ein markanter Verlauf der Reibwertentwicklung. Beginnend mit einer Einlaufphase und Reibwerten in Höhe der Kurzzeitversuche steigen diese nur geringfügig an. Nach Erreichen einer bestimmten Kontaktdauer kommt es zu einem stärkeren Anstieg bis zum Erreichen eines Wertes im Bereich zwischen  $\mu = 0,4$  und  $0,6$ . Im weiteren Verlauf ist keine wesentliche Reibwertänderung mehr zu verzeichnen. Die Kontaktdauer bzw. der zurückgelegte Gleitweg bis zum Einsetzen des verstärkten Reibwertanstieges ist abhängig vom  $p_v$ -Wert. In Abbildung 5.62 sind die Reibwertentwicklungen bei unterschiedlichen  $p_v$ -Werten dargestellt. Die Gleitpaarung mit dem niedrigsten  $p_v$ -Wert ( $0,33 \text{ W/cm}^2$ ) weist einen sehr geringen Anstieg des Reibwertes auf. Nach ca. 3000 Kilometern Gleitweg und Reibwerten von  $\mu = 0,45$  ist ein Zustand erreicht, nach dem nur noch ein geringer Reibwertanstieg zu verzeichnen ist. Einen sehr steilen Anstieg des Reibwertverlaufes weist die Paarung mit dem größten  $p_v$ -Wert ( $1,2 \text{ W/cm}^2$ ) auf. Alle durchgeführten Untersuchungen an PE-UHMW Gleitschienen an PAZ-Zahnriemen weisen diesen charakteristischen Verlauf auf.

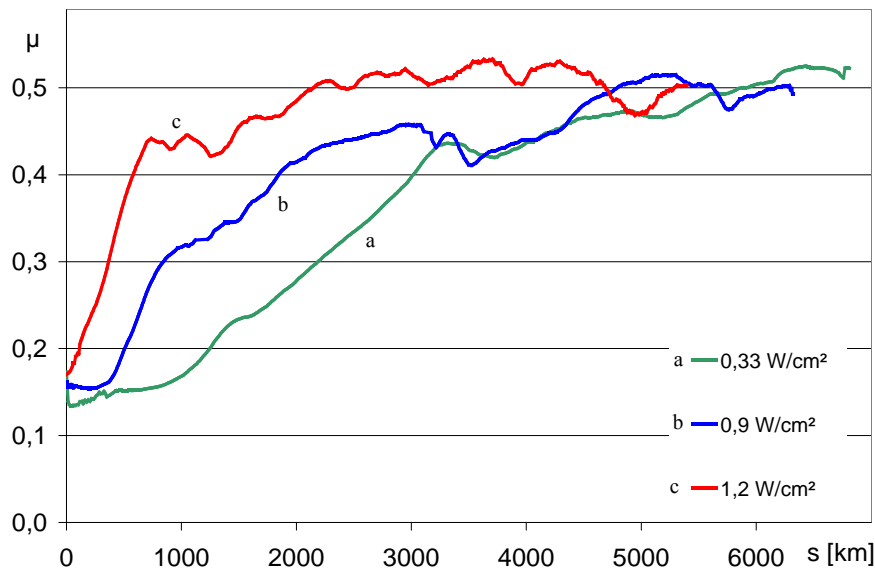


Abbildung 5.62: Reibwertentwicklung PE-UHMW - PAZ-ZR

Die Reibwerte aus den Dauerversuchen sind in Abbildung 5.63 dargestellt. Unabhängig von der Geschwindigkeit und Flächenpressung bewegen sich die Wert im Bereich zwischen  $\mu = 0,4$  bis  $0,6$ .

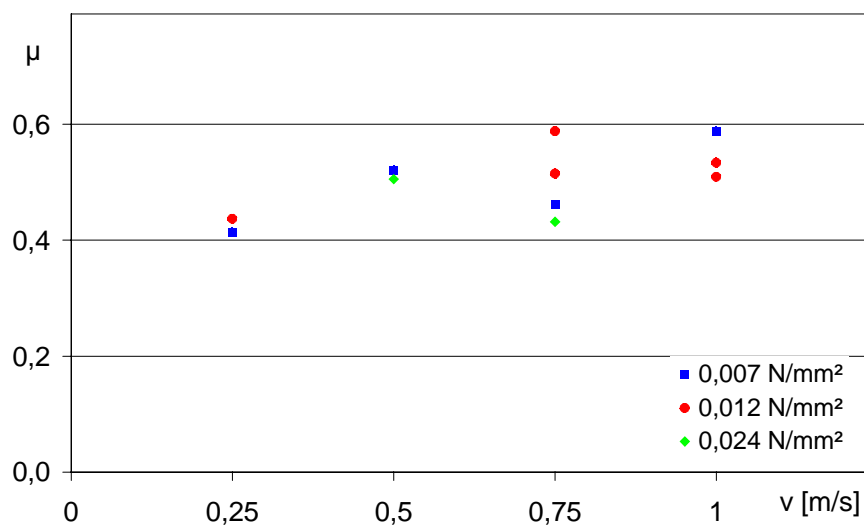


Abbildung 5.63: Ergebnisse der Dauerversuche PE-UHMW- PAZ-ZR

Nach Erreichen des relativ stabilen Zustandes mit Reibwerten im Bereich von ca.  $\mu = 0,45$  ist auch bei einer weiteren Beanspruchung (über 150 Tage) der Paarung nur eine geringe Reibwertveränderung bis  $\mu = 0,52$  feststellbar (Abbildung 5.64).



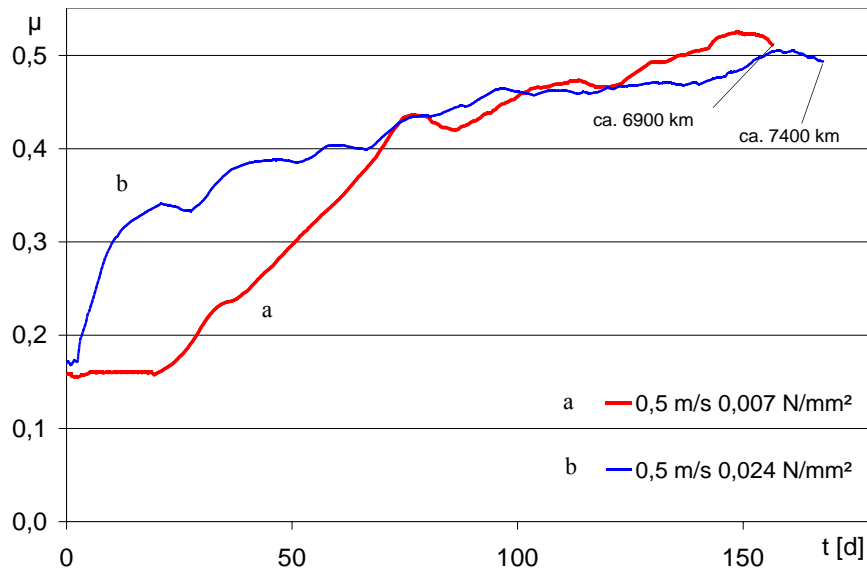


Abbildung 5.64: Reibwertentwicklung bei Dauerbelastung

Die Erhöhung der Reibungszahlen an der Paarung PE-UHMW - polyamidbeschichteter Zahnriemen kann nicht unmittelbar auf direkte Verschleißerscheinungen am Zahnriemen zurückgeführt werden. Die Gleitflächen am Zahnriemen weisen auch nach längerem Kontakt keine sichtbaren Schäden auf, es lagern sich jedoch geringe Mengen von Partikeln an den Fasern des Gewebes ab (Abbildung 5.66).

Es bildet sich ein polymerer Film auf der PE-UHMW-Gleitfläche aus. Dieser ist im Gegensatz zu anderen Paarungen nicht geschlossen, sondern weist eine schuppige Struktur auf (Abbildung 5.67). Bei mikroskopischer Betrachtung der einzelnen Schuppen ist festzustellen, dass diese strukturiert sind (Abbildung 5.68). Bereiche ohne Zwischenschicht sind weiterhin vorhanden. Durch mechanische Einflüsse kommt es teilweise zur Riefenbildung in der Ablagerung (Abbildung 5.69). Zum Vergleich ist in Abbildung 5.65 die Oberflächenstruktur einer Stützschiene ohne Kontakt zum Zahnriemen dargestellt.



Abbildung 5.65: PE-UHMW Probe ohne Gleitkontakt

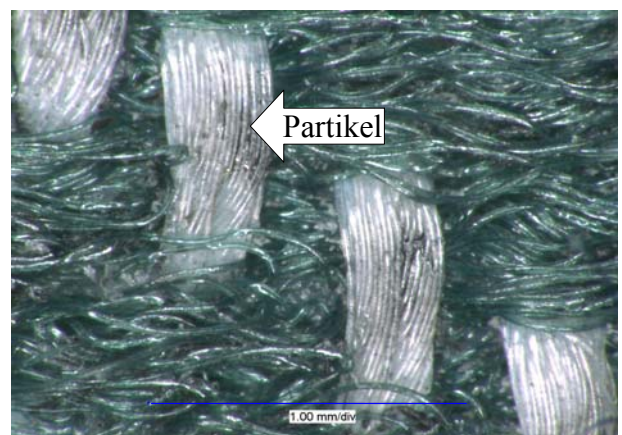


Abbildung 5.66: PA-Gewebe mit Verschleißpartikel PE

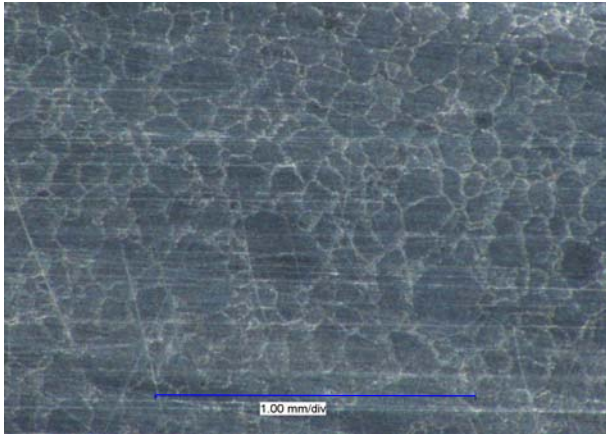


Abbildung 5.67: Schuppige Ablagerung auf PE-UHMW Gleitfläche

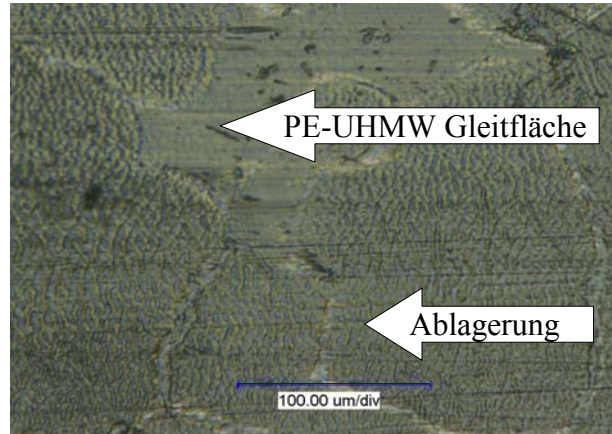


Abbildung 5.68: Polymerablagerungen an PE-UHMW-Gleitschiene und ablagerungsfreie Zonen

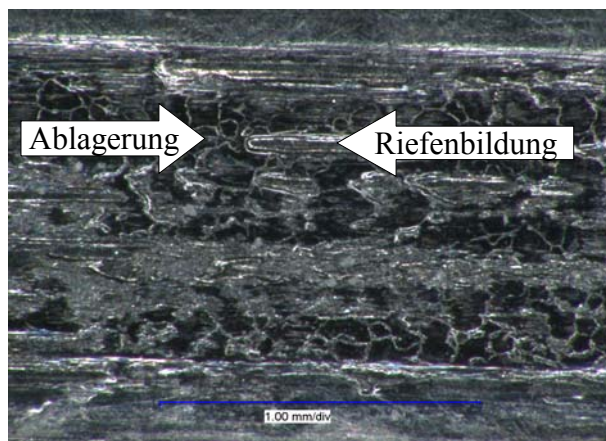


Abbildung 5.69: PE-UHMW Ablagerung und Riefen

#### 5.4.3.4 PAZ-Zahnriemen - Aluminiumgleitschienen

Aluminiumstützschienen wurden in einer geschliffenen (Rz 4) und an überfrästen (Rz 25) Proben gegen PA beschichtete Zahnriemen untersucht.

Die Reibwerte der geschliffenen Probe beginnen mit Reibwerten von  $\mu = 0,4$  und erreichten innerhalb von 24 Stunden einen Wert von  $\mu = 0,7$  bei Kontakttemperaturerhöhungen von 35 Kelvin (Abbildung 5.70). Im weiteren Verlauf steigen die Reibwerte nur noch geringfügig auf Werte von  $\mu = 0,75$  an. Innerhalb sehr kurzer Zeit bildete sich auf der Aluminiumoberfläche ein geschlossener Polymerfilm aus (Abbildung 5.71), der Kontakt zwischen Aluminiumoberfläche und Zahnriemen wird durch eine Paarung Polymer – Polymer abgelöst.

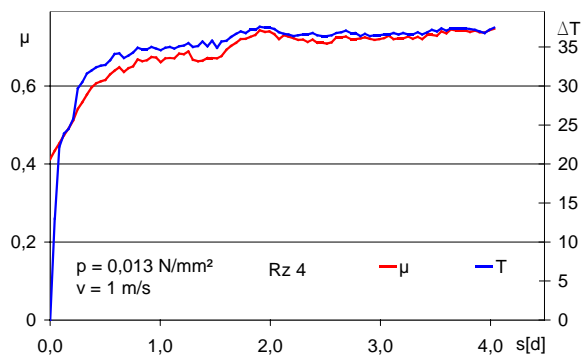


Abbildung 5.70: Aluminium Rz 4 - PAZ-ZR

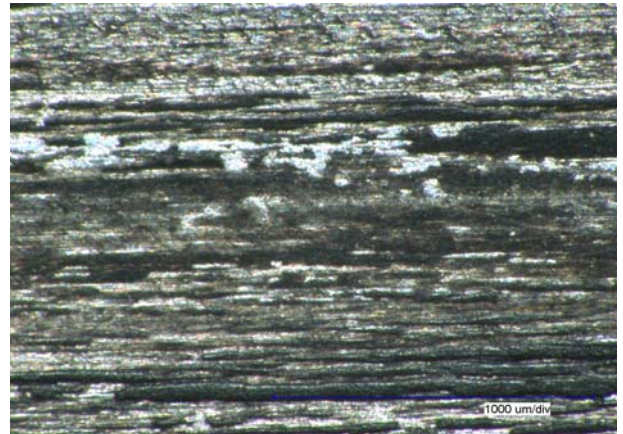


Abbildung 5.71: Polymerfilm auf Aluminiumgleitfläche

Bei der Untersuchung von Stützschiene mit einer Oberflächenrauheit von Rz 25 bei gleicher Geschwindigkeit (1 m/s) und Flächenpressung (0,013 N/mm<sup>2</sup>) stellen sich im Einlauf ebenfalls Reibwerte von  $\mu = 0,4$  ein. Die Steigerung auf Werte von  $\mu = 0,7$  findet kontinuierlich innerhalb von 20 Tagen statt. Die Oberflächenstruktur der Aluminiumgleitfläche wird durch Verschleiß geglättet (Abbildung 5.73). Die Ablagerung einer Polymerschicht auf der verschlissenen Oberfläche ist ebenfalls zu beobachten. Die vollständige Abtragung der Gewebeschicht nach einer Versuchsdauer von ca. 80 Tagen ist bei den verwendeten Zahnriemen zu beobachten. In Abbildung 5.74 ist der verschlissene Zahnriemen mit noch in der Matrix eingebetteten Fasern zu sehen.

Für die Langzeituntersuchung von ca. 80 Tagen wurden je ein Zahnriemen mit PA-grün und PA-grau verwendet. Sowohl der Reibwertverlauf als auch das Verschleißverhalten weisen keine wesentlichen Unterschiede auf.

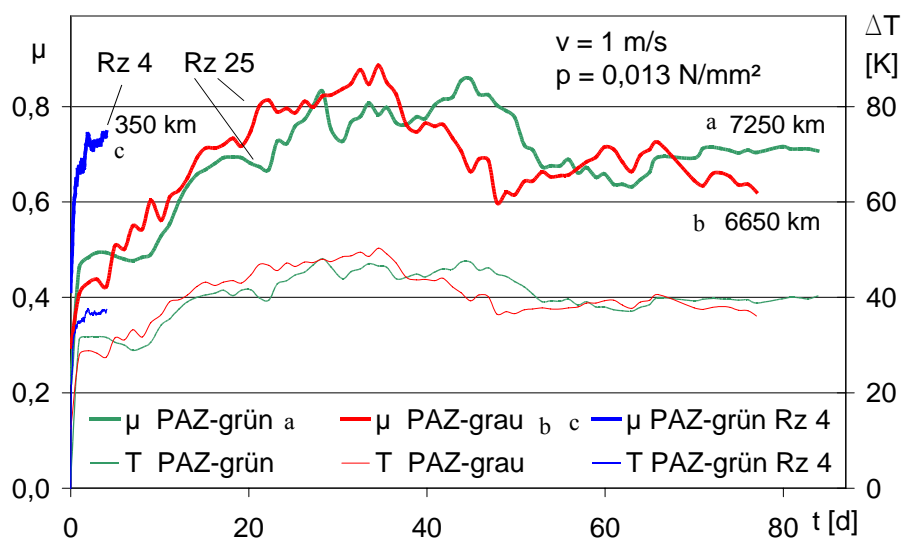


Abbildung 5.72: Reibwertentwicklung Aluminiumgleitschiene – ZR PAZ, Daueruntersuchung



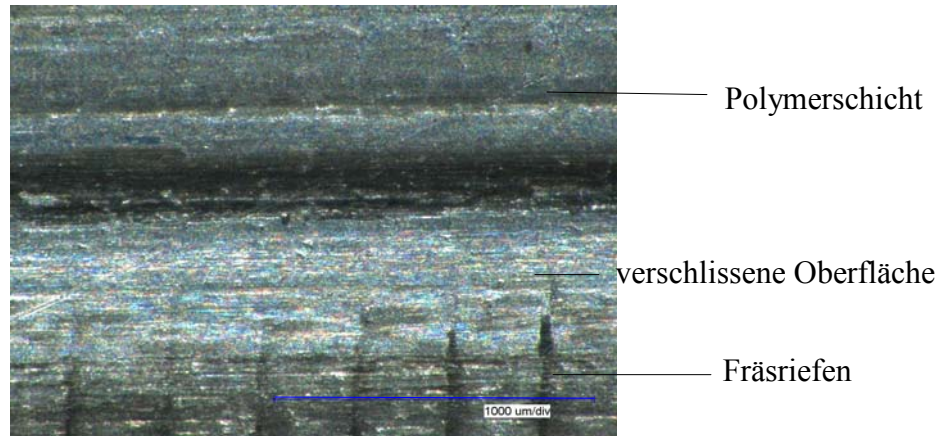


Abbildung 5.73: Verschleiß Aluminiumoberfläche Rz25



Abbildung 5.74: Verschleiß der PA-Gewebeschicht

#### 5.4.3.5 PAZ-Zahnriemen - PA 6 Guss Öl-Gleitschienen

Der Reibwertverlauf der Paarung PAZ-Zahnriemen - PA 6 Guss Öl-Gleitschienen über eine Belastungsdauer von ca. 24 Stunden ist in Abbildung 5.75 dargestellt. Ein stetiger Anstieg der Reibwerte, beginnend bei  $\mu = 0,19$ , bei einer Geschwindigkeit von 0,25 m/s, wird auch durch eine 10-stündige Unterbrechung nicht gestört und erreicht nach einer Belastungsdauer von ca. 22 h einen Reibwert von  $\mu = 0,35$ . Nach einer Steigerung der Geschwindigkeit auf 0,5 m/s steigt der Reibwert innerhalb von 1 h auf  $\mu = 0,5$  an. Eine weitere Unterbrechung von 10 h und anschließender dynamischer Belastung lässt den Reibwert von  $\mu = 0,3$  innerhalb von ca. 1 h auf Werte von  $\mu = 0,4$  ansteigen.



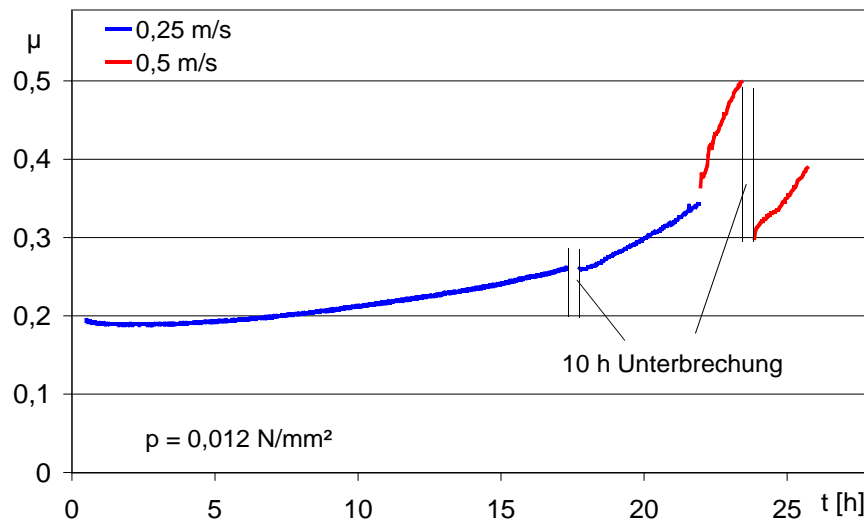


Abbildung 5.75: Reibwertentwicklung PA6G Öl – ZR PAZ

Die Untersuchung einer weiteren Probe mit konstanter Geschwindigkeit von  $0,5 \text{ m/s}$  ist in Abbildung 5.76 dargestellt. Bei der Untersuchung ist ein deutlicher Reibwertanstieg bis  $\mu = 0,7$  mit einer Kontakttemperaturerhöhung von 30 Kelvin innerhalb von 3 Tagen festzustellen. Die Ausgangswerte mit  $\mu = 0,2$  korrespondieren mit den Werten aus dem Kurzzeitversuch. Nach diesem Maximum fällt der Reibwert deutlich auf Werte von  $\mu = 0,5$  ab.

Wird die Paarung entlastet, ist bei erneuter dynamischer Belastung kein deutlich ausgeprägtes, schnelles Ansteigen des Reibwertes bis zu einem Maximum feststellbar. Der Startwert ( $\mu = 0,45$ ) liegt deutlich über dem Wert des Ersteinlaufs.

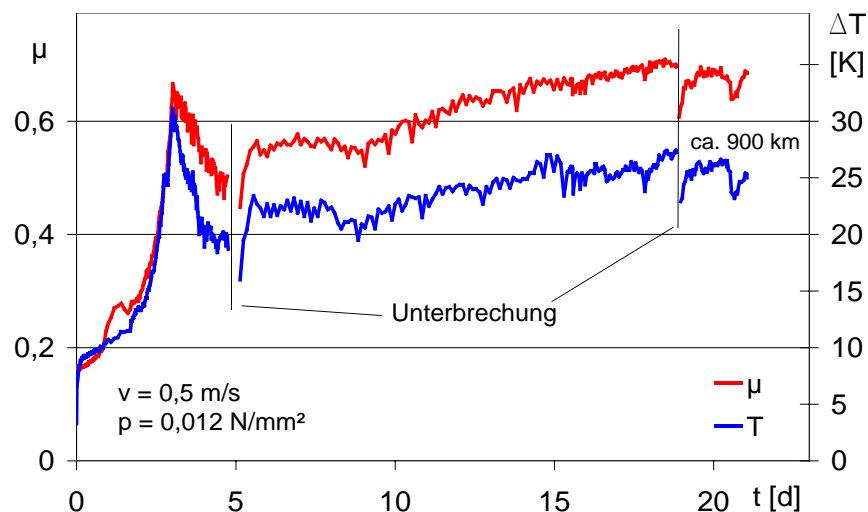


Abbildung 5.76: Reibwertentwicklung PA6G Öl – ZR PAZ

Innerhalb von 15 Tagen erfolgt ein stetiger Anstieg auf Werte des Maximums der Einlaufphase. Bei einer erneuten Entlastung des Systems mit anschließender Belastung sinkt der Reibwert nicht mehr wesentlich ab. Es ist keine polymere Ablagerung auf der Gleitfläche feststellbar.

Die Beobachtung zeigt, dass neben dem Effekt der Reibwertänderung durch den Paarungseinlauf zusätzlich der Verlust von Schmierstoff aus der Oberfläche des Gusspolyamids Einfluss auf die Höhe des Reibwerte hat. Durch die fehlenden Gleitmittel kommen direkt Polyamidgewebe und Polyamidgleitschiene in tribologischen Kontakt. Die hohen Reibwerte der Paarung PA-Gewebe gegen PA6-Gleitschiene bestätigen die Ergebnisse von Erhard [ERH80].

#### 5.4.4 Kontakttemperatur

In Abbildung 5.77 ist die Temperaturverteilung einer im thermischen Gleichgewicht befindlichen der Versuchsanordnung, aufgenommen mit einer Thermografiekamera, zu sehen. Die maximale Temperatur an der Zahnriemenoberfläche nach dem Kontakt mit der Gleitprobe am Zahnriemenauslauf beträgt  $34,1^{\circ}\text{C}$ . Während des Umlaufs bis zum Zahnriemen einlauf erfolgt ein geringe Abkühlung des Zahnriemens auf  $33,5^{\circ}\text{C}$ .

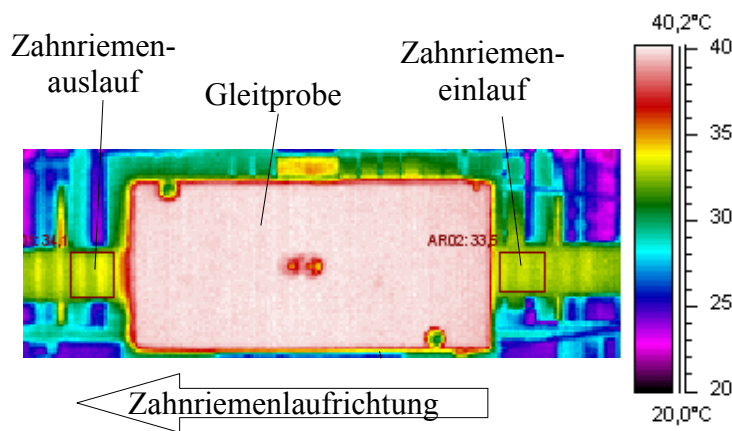


Abbildung 5.77: Draufsicht auf Gleitprobe und Zahnriemen

Das Temperaturprofil vom Zahnriemen einlauf über die Gleitprobe bis zum Zahnriemen einlauf ist in Abbildung 5.78 dargestellt. Deutlich tritt der Temperatursprung zwischen Gleitprobe und Zahnriemen hervor.

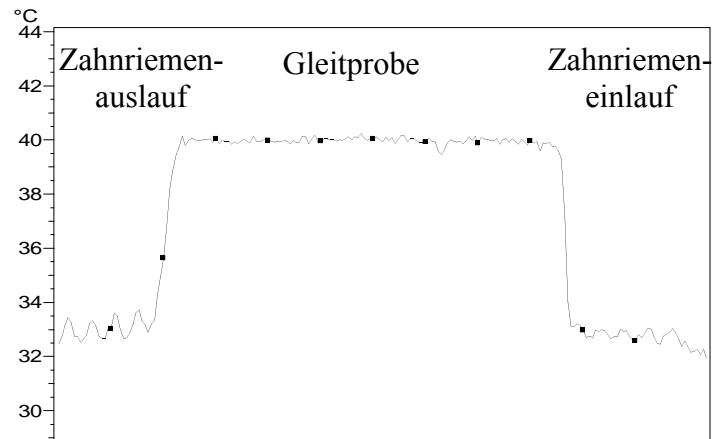


Abbildung 5.78: Temperaturprofil der Abbildung 5.77, zahnriemenmittig

Höhere Temperaturen in der Gleitprobe resultieren aus dem Dauerkontakt mit dem jeweiligen Zahnriemenabschnitt und damit ständiger erzeugter und abgeführter Reibleistung. Der Zahnriemen befindet sich nur einen Teil seines Umlaufs im Gleitkontakt mit dem Probenmaterial, der erzeugte Wärmestrom verteilt sich über die gesamte Länge des Zahnriemens. Die Kontaktzeit reicht nicht aus, um die Temperatur im Zahnriemen auf die Höhe des Gegenkörpers anzugleichen.

Die Temperaturverteilung unmittelbar am Auslauf des Zahnriemens ist in Abbildung 5.79 dargestellt. Die höchsten Temperaturen treten unmittelbar nach dem Kontakt mit der Gleitschiene auf. Die Temperatur der Zahnriemenköpfe verringert sich mit dem zurückgelegtem Weg ohne Gleitkontakt. Der Zahngrund weist eine deutlich niedrigere Temperatur auf.

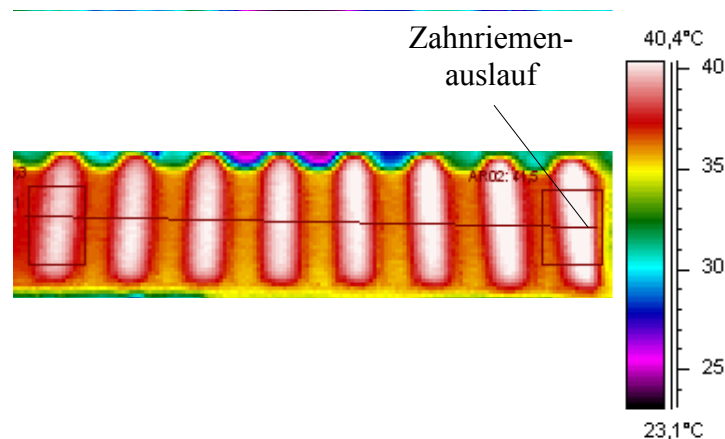


Abbildung 5.79: Temperaturverteilung am Zahnriemen

Das Temperaturprofil eines für die Abbildung 5.79 ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Temperaturdifferenz zwischen Zahnkopf und Zahngrund beträgt bis zu 4,5 Kelvin. Der relativ große

Temperaturunterschied kann mit der geringen Wärmeleitfähigkeit des Polyurethans begründet werden.

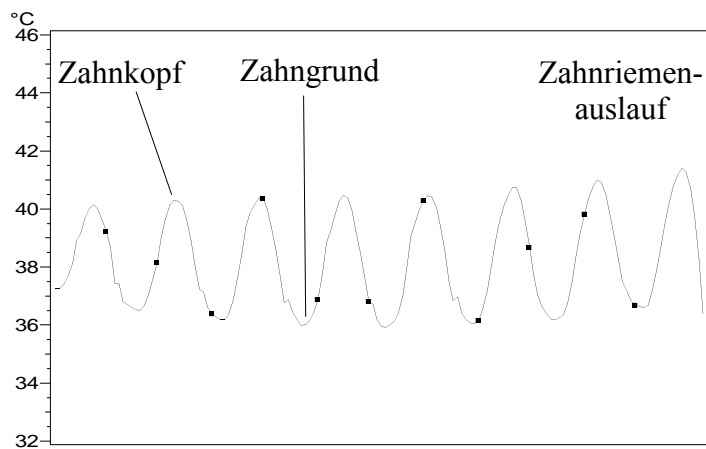


Abbildung 5.80: Temperaturverteilung am Zahnriemen nach Abbildung 5.79

Die Temperaturdifferenzen zwischen Zahnriemen und Abstützung, Ein- und Auslauf des Zahnriemens und zwischen Zahngrund und Zahnkopf sind abhängig von den thermischen Bedingungen (Materialien, konstruktiver Aufbau) und den Beanspruchungen (Geschwindigkeit, Flächenpressung, Reibwert) der Fördereinrichtung.

Für die thermische Untersuchung am Zahnriemenförderer ist die zu erwartende maximale Kontakttemperatur in der Wirkpaarung entscheidend. Die Gleitschiene steht sowohl in der realen Fördereinrichtung als auch im Prüfstand kontinuierlich mit dem Zahnriemen im Eingriff. Die Temperaturentwicklung am Prüfstand ist gut mit den zu erwartenden Ergebnissen des realen Einsatzes vergleichbar.

Die Kontaktdauer des Zahnriemens am Versuchsstand ist geringer als im realen Einsatzfall. In Zahnriemenförderern befindet sich der Riemen im Untertrum nicht mehr im Kontakt mit der Stützschiene und kann durch Konvektion eine entsprechende Wärmemenge abgeben. Die Abgabe von einer entsprechenden Wärmemenge über die Antriebs- bzw. Umlenkscheibe sowie über die Zahnseite (realer Einsatz) bzw. den Zahnriemenrücken (Versuchsstand) ist im thermisch stationären Betrieb gering, da die Erwärmung der Bauteile zu einer geringen Temperaturdifferenz führen und damit der Wärmestrom zwischen dem Zahnriemen und den Scheiben verringert wird.

Die Übertragbarkeit der thermischen Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen ist gewährleistet, da für die Auswertungen die Gleitschientemperatur, unmittelbar an der Kontaktzone gemessen, ermittelt wird.

#### 5.4.4.1 Thermische Untersuchungen

Überschreitet die Kontakttemperatur bei Zahnriemen - Stützschiene-Kombinationen eine bestimmte Größe, kommt es zu erhöhtem Verschleiß bzw. zum Ausfall der Gleitpaarung. Die Kenntnis der Kontakttemperatur ist für eine sichere Auslegung von Zahnriemenfördersystemen notwendig.

Die Temperaturen in der Kontaktzone steigen mit der Belastungsdauer an, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Wird der stationäre Zustand der Wärmeleitung erreicht, entspricht der Wärmestrom der erzeugten Reibleistung. Das thermische Einlaufverhalten unterschiedlicher Stützschiene-Materialien ist in Abbildung 5.81 dargestellt. Dem steilen Anstieg der Kontakttemperatur in den ersten Minuten und flacheren Verlauf im weiteren Verlauf bei Materialien mit geringer Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit (Holz, PE-UHMW) steht der flachere Verlauf der Materialien mit großer Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit (Stahl) gegenüber.

Der „Knick“ in der Temperaturentwicklung bei Gleitschiene aus PE-UHMW und Schichtholz resultiert auf dem mehrschichtigen Aufbau aus Materialien mit unterschiedlichen Temperaturleitfähigkeiten (Holz:  $a = 0,18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ; PE UHMW:  $a = 0,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ; Stahl:  $a = 3,91 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Der Wärmestrom durchdringt die Gleitflächen mit niedrigen Temperaturleitwert und erhöht dabei die Gleitflächentemperatur. Beim Auftreffen auf die Stahlschicht mit einer hohen Temperaturleitfähigkeit wird der Wärmestrom schneller abgeführt und es kommt nur noch zu einem geringen Anstieg der Kontakttemperatur.

Die Temperaturentwicklung entsprechen den exponentiellen Beziehungen nach den Gleichungen (3.8) und (3.9), wobei die Verläufe für Schichtholz und PE-UHMW in zwei Teilbereiche mit unterschiedlichen Parametern aufgeteilt werden müssen. Der erste Bereich beschreibt die Entwicklung der Temperatur im Gleitkontakt für den Zeitraum, in dem sich der Wärmestrom nur im Bereich mit niedriger Temperaturleitfähigkeit ausbreitet. Die Temperatur steigt sehr schnell an. Die Paarungen nähern sich einer Gleichgewichtstemperatur, an der die erzeugte Reibleistung als Wärmestrom vollständig durch die einzelnen Schichten geleitet und über die Oberfläche abgeführt wird.

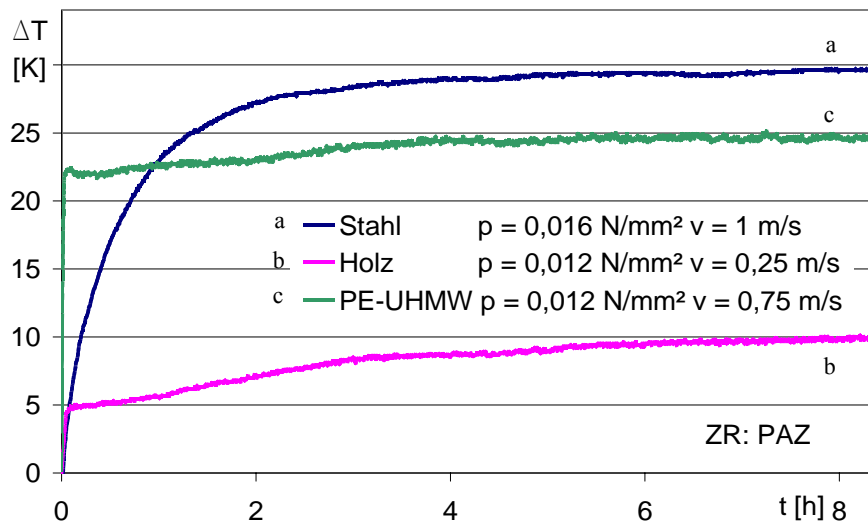


Abbildung 5.81: Thermischer Einlauf verschiedener Gleitschienenmaterialien

Nach ca. 5 bis 8 Stunden ist die sich einstellende stationäre Kontakttemperatur erreicht. Schwankungen der Kontakttemperatur werden z. B. durch Änderung der Reibwerte bzw. Umgebungstemperatur hervorgerufen. Für die Auslegung von Fördersystemen ist die Kenntnis dieser Temperatur wichtig, da bei einer Überschreitung einer Grenztemperatur eine Funktionssicherheit nicht mehr gewährleistet werden kann bzw. ein verstärkter Verschleiß zu erwarten ist.

Die sich einstellende stationäre Kontakttemperatur ist von technologischen und konstruktiven Parametern abhängig. Im Wesentlichen soll diese in Abhängigkeit von der sich einstellenden Reibleistung mit den Komponenten Gleitgeschwindigkeit, Flächenpressung und Reibwert und der zugehörigen Wärmeleitung beschrieben werden. Für diese Untersuchungen wurden die Paarungen Schichtholz, PE-UHMW und Stahl in Verbindung mit PA-beschichteten Zahnriemen verwendet, da diese Paarungen für den Einsatz in Fördersystemen, auf Grund der Erkenntnisse der Dauerversuche, am besten geeignet sind.

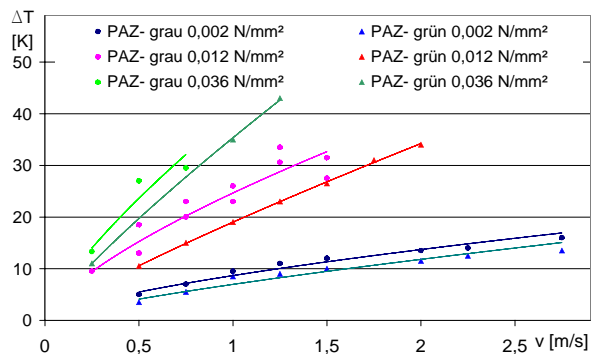


Abbildung 5.82: PAZ-ZR - Schichtholz 6 mm

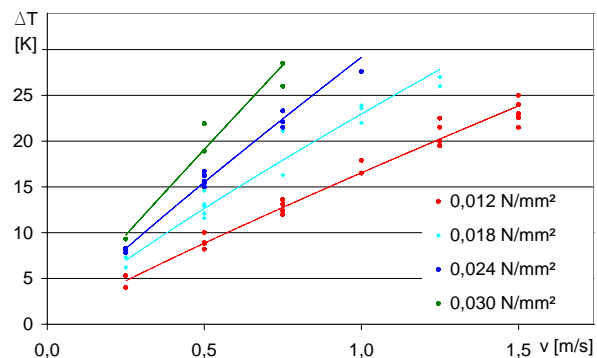


Abbildung 5.83: PAZ-ZR - PE-UHMW 2 mm

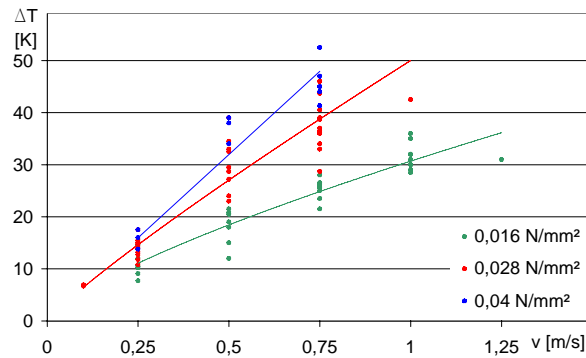


Abbildung 5.84: PAZ-ZR - Stahl, ohne Isolierung

Die Temperaturerhöhungen mit steigender Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Flächenpressungen am PA-beschichteten Zahnriemen in Verbindung mit verschiedenen Gleitschienen ist in den Abbildungen 5.82 bis 5.84 dargestellt. Mit zunehmenden Flächenpressungen und Geschwindigkeiten steigen die Kontakttemperaturen infolge höherer Reibleistungen an.

Die geringfügig niedrigeren Kontakttemperaturen bei PAZ-grün Zahnriemen in Verbindung mit Holzgleitschienen ergeben sich aus den etwas geringeren Reibwerten bei dieser Versuchsreihe (Abbildung 5.82). Sehr gut ist die Parallelverschiebung der Ausgleichsgeraden bei gleicher Pressung und unterschiedlichen Reibwerten zu sehen.

Die Kontakttemperaturentwicklung bei verschiedenen Flächenpressungen bei steigenden Geschwindigkeiten ist in Abbildung 5.83 beispielhaft für eine 2 mm PE-UHMW-Stützschiene dargestellt. Die Temperaturentwicklung für Schichtdicken von 4 bis 12 mm verläuft tendenziell gleich, jedoch auf höheren Niveau.

Die deutlich unterschiedlichen Kontakttemperaturen bei gleicher Geschwindigkeit und Flächenpressung an den Stahlstützschienen resultieren aus unterschiedlich hohen Reibwerten und damit unterschiedlichen Reibleistungen an der Wirkstelle. Eine Variation der Dicke der Stahlgleitschiene selbst ist für die Untersuchungen nicht notwendig, da sich eine gleichmäßige Erwärmung auf Grund der guten Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Materialstärke ergibt (siehe auch Abbildungen 4.8 4.9 ). Das Einfügen einer thermischen Isolierschicht erhöht die Kontakttemperatur und bildet z. B. die Befestigung der Stahlgleitschiene in Gestellbaugruppen an Kunststoffelementen ab.

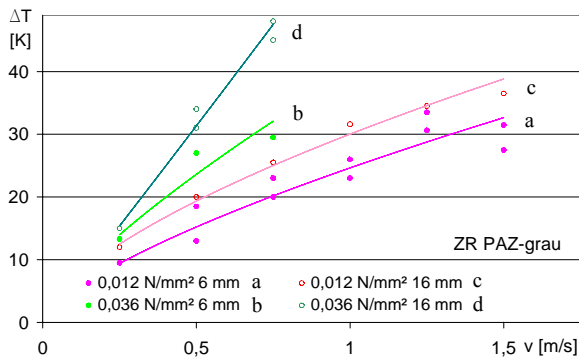


Abbildung 5.85: Schichtholz mit unterschiedlichen Materialstärken und Flächenpressungen

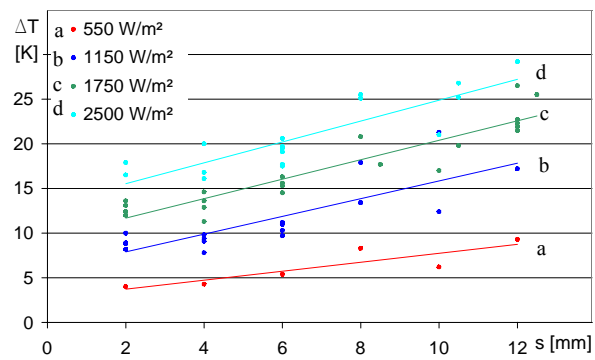


Abbildung 5.86: PE-UHMW Kontakttemperatur bei unterschiedlichen Schichtstärken und Reibleistungen

Wird die Schichtstärke der Stützschiene vergrößert (PE-UHMW, Holz) bzw. eine Isolierschicht aus PE an Stahlgleitschienen eingefügt, steigt bei gleicher Reibleistung die Kontakttemperatur an. Dies entspricht den Gesetzmäßigkeiten der Wärmeleitung nach Gleichung (4.9) in welcher der Wärmestrom in Abhängigkeit von Schichtstärke, Wärmeleitzahl und Temperaturdifferenz beschrieben wird.

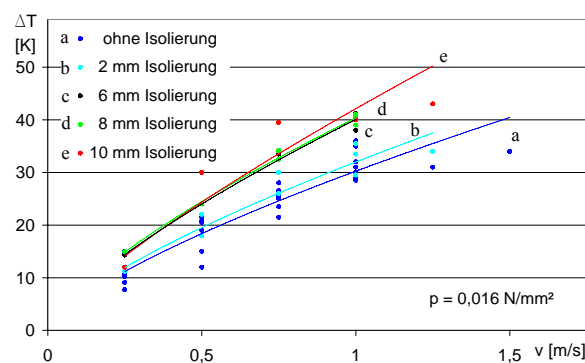


Abbildung 5.87: Stahl mit verschiedenen PE-Isolierschichtstärken

Höhere Temperaturen bei Materialstärken von 16 mm an der Schichtholzgleitschiene im Vergleich mit 6 mm Stützschiene sind sowohl bei einer projizierten Flächenpressung von 0,012 N/mm² als auch bei 0,036 N/mm² zu verzeichnen (Abbildung 5.85).

Wird die Variation der Schichtstärken in mehreren Stufen durchgeführt, kann der Einfluss der Schichtstärke auf die Temperatur untersucht werden. In Abbildung 5.86 ist dies an PE-UHMW an Materialstärken von 2 mm bis 12 mm und verschiedenen Reibleistungen dargestellt. Für die Realisierung der Versuche wurden bei konstantem pv-Wert die Schichtstärken von 2 mm in Stufen von 2 mm bis auf 12 mm erhöht und die Temperaturen aufgezeichnet. Der pv-Wert wurde in 4 Stufen variiert, indem die Gleitgeschwindigkeit in Stufen von 0,25 m/s bis auf 1 m/s bei gleich bleibender Flächenpressung erhöht wurde. Die angegebene Reibleistung berücksichtigt jeweils



die sich einstellende Reibungszahl. Ein linearer Zusammenhang zwischen Schichtstärke und Kontakttemperatur ist zu verzeichnen.

Durch Einfügen von Isolierschichten mit unterschiedlicher Materialstärke wurde das Temperaturgefälle zwischen Wirkstelle und Umgebung bei Stahlgleitschienen untersucht. Bei verschiedenen Flächenpressungen wurde sowohl die Schichtstärke der Isolierung (PE-UHMW) als auch die Geschwindigkeit erhöht. In Abbildung 5.87 sind die Messwerte für die Pressungsstufe 0,016 N/mm<sup>2</sup> dargestellt. Sowohl mit steigenden Geschwindigkeiten erhöht sich die Kontakttemperatur durch die höhere Reibleistung als auch mit Zunahme der Isolierschicht auf Grund des höheren Wärmewiderstandes.

Bei der Wiederholung der einzelnen Versuche unter gleichen Versuchsbedingungen stellten sich teilweise unterschiedliche Kontakttemperaturen ein. Diese Abweichungen resultieren aus den sich unterschiedlich einstellenden Reibungszahlen und den dadurch nicht konstanten Reibleistungen bei gleichen pv-Werten.

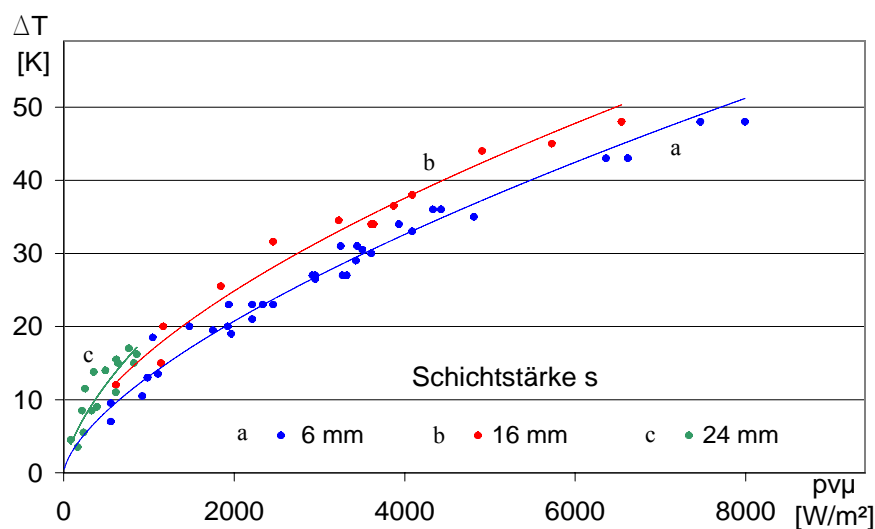


Abbildung 5.88: Kontakttemperatur ZR PAZ – Holzgleitschiene,

Werden alle Messwerte für die Paarung Schichtholz – PAZ Zahnriemen mit ihrer Reibleistung ( $p \cdot v \cdot \mu$ ) und Kontakttemperatur, unterteilt nach Schichtstärke der Gleitfläche, abgebildet, so ergibt sich die Darstellung der Abbildung 5.88. Ein degressiver Zusammenhang zwischen eingebrachter Reibleistung in der Wirkstelle und der Kontakttemperaturerhöhung ist zu verzeichnen. Die Messung der Kontakttemperaturen wurde an den Holzgleitschienen an den Materialstärken 6 mm, 16 mm und 24 mm durchgeführt. Die Paarung mit 24 mm Schichtstärke wurde nur mit einer Flächenpressung von 0,002 N/mm<sup>2</sup> beaufschlagt, die beiden anderen Paarungen mit schrittweisen Steigerungen von 0,012 N/mm<sup>2</sup> bis 0,036 N/mm<sup>2</sup>. Die Geschwindigkeit wurde von 0,25 m/s bis 2 m/s variiert.

Die Darstellung der Temperaturschätzungen an PE-UHMW-Schienen im Gleitkontakt mit PA beschichteten Zahnriemen ist in Abbildung 5.89 aufgezeigt. Die Messpunkte für die einzelnen Reibleistungen mit den dazugehörigen Temperaturerhöhungen sind farblich nach Schichtstärken unterteilt. Die Ausgleichskurven verlaufen für alle Materialstärken degressiv. Die niedrigsten Temperaturerhöhungen treten bei kleinen Schichtstärken der Gleitschiene auf.

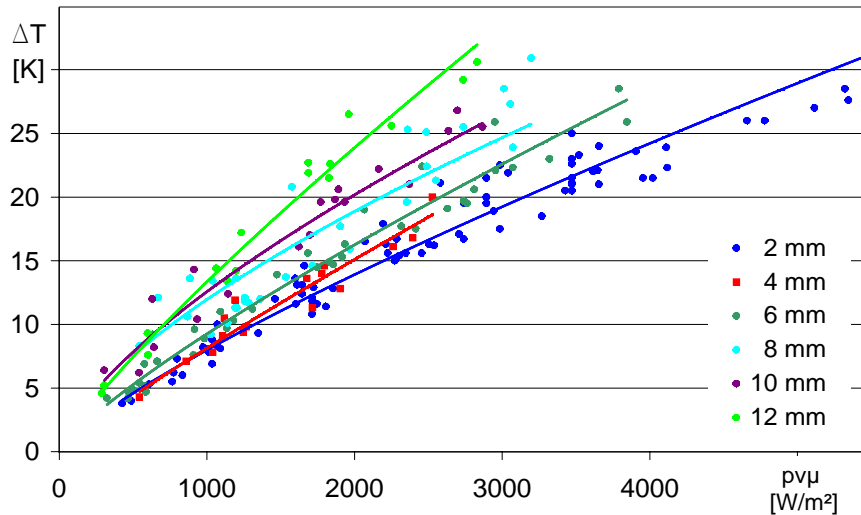


Abbildung 5.89: Kontakttemperatur ZR PAZ – PE-UHMW

Der prinzipielle Verlauf der Temperaturerhöhung an Stahlgleitschienen entspricht dem der Paarungen PE-UHMW und Holz: degressiver Verlauf aller Messwerte mit steigenden Reibleistungen und geringere Temperaturerhöhungen bei geringeren Isolierschichtstärken (Abbildung 5.90).

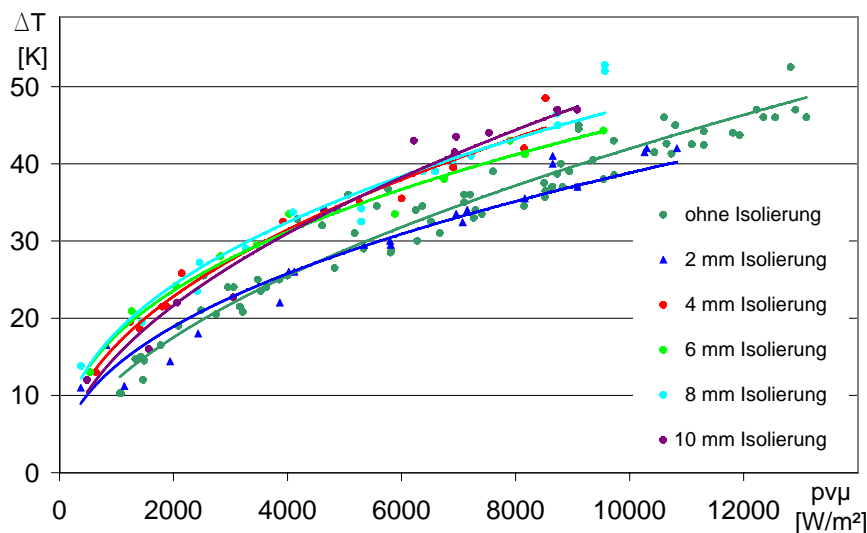


Abbildung 5.90: Kontakttemperatur ZR PAZ – Stahl, Isolierschichtabhängigkeit

#### 5.4.4.2 Thermische Zerstörung der PE-UHMW Gleitschienen

Die thermische Zerstörung von PE-UHMW Gleitschienen bedeutet für das Gleitsystem die Überschreitung der oberen Einsatzgrenze der Paarung. Die thermische Einsatzgrenze wird überschritten, wenn bei Erreichen der Grenztemperatur der zugeführte Wärmestrom (Reibleistung pro Fläche) größer ist als der abgeführte Wärmestrom. Dies kann plötzlich bei Änderung der Belastung erfolgen (z. B. Geschwindigkeitssteigerung, Abbildung 5.38) oder durch einen kontinuierlichen Temperaturanstieg innerhalb des instationären Abschnittes des Wärmedurchgangs (Abbildung 5.91). Bei konstanten Reibwerten von ca.  $\mu = 0,2$  steigt die Temperatur kontinuierlich bis zum Erreichen der Grenztemperatur an. Wird diese erreicht, steigt der Reibwert deutlich an. Die höhere Reibleistung verursacht einen plötzlichen Temperaturanstieg. Ein lokales Aufschmelzen der PE-Gleitfläche ist zu beobachten (Abbildung 5.93). Die relativ hohen Reibwerte resultieren aus PE-Ablagerungen auf dem Gewebe des Zahnriemens (Abbildung 5.92). Die dadurch entstehende Gleitpaarung PE – PE mit Reibwerte von  $\mu = 0,45$  wurden auch von Erhard in [ERH80] dokumentiert.

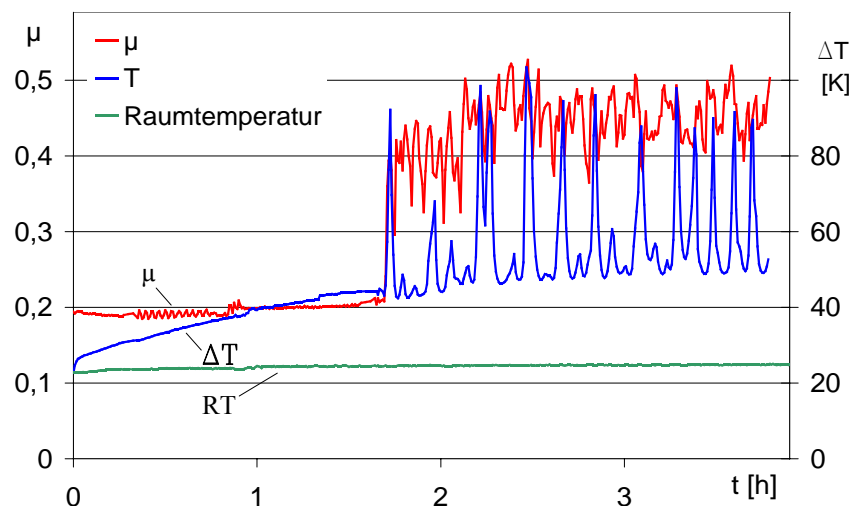
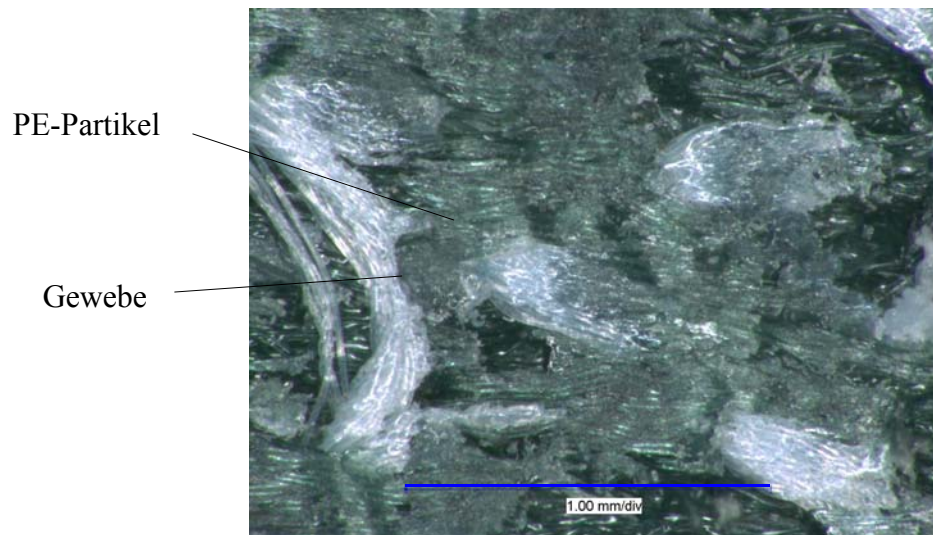
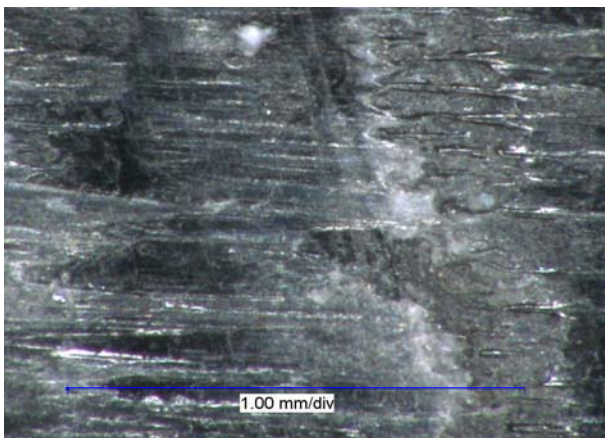


Abbildung 5.91: PE-UHMW, thermische Zerstörung, 1,5 m/s; 0,012 N/mm<sup>2</sup>

Im weiteren Verlauf treten einzelne Temperaturspitzen bis 120°C auf, welche jedoch immer wieder auf eine Kontakttemperatur von 70 °C abfallen. Wird die Paarung weiter betrieben, kommt es zur vollständig Abtragung der Gewebeschicht am Zahnriemen (Abbildung 5.94).



*Abbildung 5.92: Gewebe mit PE-Partikeln aus Aufschmelzung*



*Abbildung 5.93: Anschmelzungen an PE-Gleitschiene*



*Abbildung 5.94: geschmolzener Zahnriemenkopf an PE*

## 5.5 Bewertung der Versuchsergebnisse

### 5.5.1 Zusammenfassung Kurzzeitversuche

Aus den Ergebnissen der experimentellen Kurzzeituntersuchungen können für Polyurethanzahnriemen mit und ohne Polyamidgewebebeschichtung wesentliche tribologische Unterschiede festgestellt werden. Unbeschichtete Zahnriemen weisen auf Grund ihrer glatten, elastischen Oberfläche sehr hohe reale Kontaktflächen und damit hohe Reibwerte, insbesondere des adhäsiven Anteils auf. Bisherige Untersuchungen bestätigen diese Ergebnisse [ACH99, HAP98]. Diese hohen Werte konnten bei allen untersuchten Paarungen festgestellt werden.

Die Paarung Schichtholz in Kontakt mit unbeschichteten Zahnriemen ist von einem sehr starken abrasiven Verschleiß geprägt. Dieser setzt ein, sobald die Oberfläche des Zahnriemens eine Erstschädigung erfährt. Diese kann bei einer Beanspruchungserhöhung bzw. infolge einer kontinuierlichen Belastung mit Erreichen einer bestimmten Kontakttemperatur erfolgen. Der Einsatz als Förderriemen sollte nur bei niedrigen Belastungen (max.  $0,01 \text{ N/mm}^2$ ) und geringen Geschwindigkeiten (max.  $0,5 \text{ m/s}$ ) in untergeordneten Anwendungen erfolgen.

Die Paarungen von Schichtholz mit PAZ-Zahnriemen weisen bei niedrigen Reibwerten ( $\mu = 0,16 \dots 0,3$ ) nur sehr geringen Verschleiß auf. Die Abhängigkeit der Paarung mit steigenden Reibungszahlen bei höheren Geschwindigkeiten ist gut darstellbar, für eine Pressungsabhängigkeit ist der untersuchte Bereich zu klein.

Reibwerte von teilweise deutlich über  $\mu = 1,0$  bis  $\mu = 1,8$  bei den Paarungen Stahl – Polyurethan, verbunden mit starken Stick-Slip-Effekten wie Vibrationen und Geräuschemissionen im untersuchten Belastungsbereich, lassen die Anwendung für Fördereinrichtungen für nicht geeignet erscheinen. Die Tendenz von höheren Reibwerten bei glatteren Oberflächen ist bei dieser Paarung durch Versuche an geschliffenen und überfrästen Stahloberflächen nachweisbar.

Stahlgleitflächen in Verbindung mit gewebebeschichteten Zahnriemen weisen Reibwerte zwischen  $\mu = 0,25$  bis  $\mu = 0,7$  mit der Tendenz von höheren Werten bei höheren Gleitgeschwindigkeiten auf. Der Einfluss der Oberflächenrauheit mit hohen Reibungszahlen bei glatten Oberflächen ( $R_z 6,3$ ) und niedrigeren Werten bei überfrästen ( $R_z 25$ ) Gleitflächen konnte dargestellt werden.

Gleitschienen aus Polyethylen-UHMW im Kontakt mit Polyurethanzahnriemen weisen einen Reibwert zwischen  $\mu = 0,3$  bis  $0,6$  auf. Eine Abhängigkeit von Flächenpressung und Geschwindigkeit ist nicht eindeutig erkennbar. Auf Grund der glatten Oberflächen der Gleitpartner und des viskoelastischen Effektes kommt es zu einer starken Annäherung und Vergrößerung der Kontaktflächen und damit zu hohen Reibwerten. Die hohen Reibwerte und die geringe Wärmeleitfähigkeit des Polyethylen lassen für diese Paarung nur einen maximalen pv-Wert von  $0,4 \text{ W/cm}^2$  zu.

Das Überschreiten des  $p_v$ -Wertes von  $0,4 \text{ W/cm}^2$  sowie das Überschreiten einer Grenzgeschwindigkeit von  $1,25 \text{ m/s}$  führt zum lokalen Aufschmelzen der Gleitschiene.

Gleitreibwerte von  $\mu = 0,15$  bis  $0,25$  mit den tendenziell höheren Werten bei höheren Geschwindigkeiten und Flächenpressungen können bei der Paarung polyamidbeschichteter Zahnriemen gegen PE-UHMW-Gleitschienen gemessen werden. Verschleiß ist weder an der Stützschiene noch an den untersuchten Zahnriemen feststellbar. Stützschienen aus PE-UHMW eignen sich in Verbindung mit PA-Gewebe beschichteten Zahnriemen auf Grund der niedrigen Reibwerte gut für den Einsatz in Zahnriemenförderern. Eine Kontakttemperatur von  $60^\circ \text{ Celsius}$  darf nicht überschritten werden, da dies zu lokalen Aufschmelzungen des Gleitschienenmaterials bis hin zum Ausfall der Paarung führt.

PTFE-Gleitschienen weisen sowohl in Kontakt mit unbeschichteten als auch beschichteten Zahnriemen sehr große Verschleißraten auf. Die Reibwerte sind stark geschwindigkeitsabhängig und liegen bei PAZ-Riemen zwischen  $\mu = 0,2$  bis  $0,35$  und bei unbeschichteten Riemen zwischen  $\mu = 0,3$  bis  $0,45$ . Bei eingelaufenen Paarungen konnten sehr stabile Reibwerte in der entsprechenden Geschwindigkeitsstufe ermittelt werden. Auf Grund des hohen Verschleißes wurden keine weiteren Untersuchungen an dieser Paarung durchgeführt.

Gusspolyamid (PA6 G Öl) in Verbindung mit beschichteten Zahnriemen zeigen niedrige Reibungszahlen ( $\mu = 0,2$ ) in der Einlaufphase mit geringfügig steigender Tendenz bei fortlaufender Versuchsdauer auf, eine Geschwindigkeitssteigerung verstärkte diesen Effekt.

Die Ergebnisse der Reibwertuntersuchungen für Polyurethan-Zahnriemen und polyamidbeschichtete Zahnriemen im Gleitkontakt mit PE-UHMW, Schichtholz- und Stahlgleitschienen ist in Abbildung 5.95 für die Kurzzeituntersuchungen (bis 8 h) dargestellt. Für die jeweiligen Paarungen wurden die Flächenpressung und die Gleitgeschwindigkeit variiert. Unbeschichtete Zahnriemen weisen deutlich höhere Reibwerte auf als mit Polyamidgewebe beschichtete Zahnriemen. Zum Vergleich durchgeführten Messungen an PTFE- und PA6G Öl Proben zeigen niedrige Reibwerte. Der Verschleiß an den PTFE- Proben rechtfertigen jedoch keinen Einsatz dieses Kunststoffes in reiner Form als Zahnriemengleitschiene. Der Einsatz in speziellen Mischungen ist weiter zu untersuchen, da besonders die hohe Temperaturbeständigkeit bei niedrigen Reibwerten für Anwendungen bei höheren Umgebungstemperaturen interessant ist.

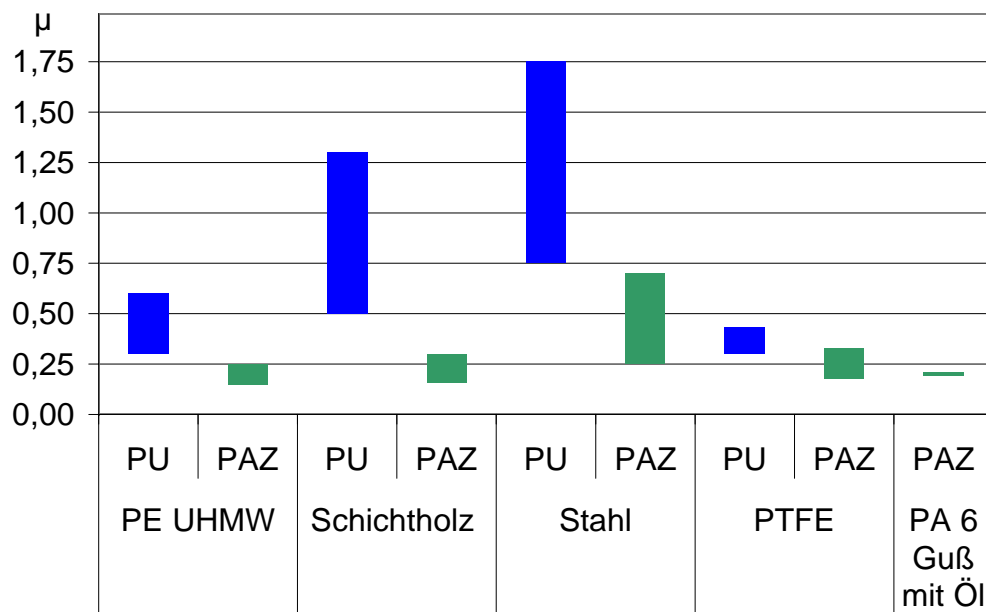


Abbildung 5.95: Reibwertverhalten Kurzzeitversuche

### 5.5.2 Zusammenfassung Dauerversuche

Für Dauerversuche wurden auf Grund der Erkenntnisse aus den Kurzzeitversuchen nur ausgewählte Paarungen verwendet. Die Untersuchungen erstreckten sich ausschließlich auf PA-beschichtete Zahnriemen in Verbindung mit Gleitabstützungen aus Stahl, Schichtholz, PA6 Guss Öl und PE-UHMW. Aluminiumgleitschienen wurden zusätzlich in die Untersuchungen als Vergleichsmaterial einbezogen.

Bereits in den Kurzzeitversuchen wurde deutlich, dass sich der Reibwert nicht als feste Größe für das jeweilige tribologische System Zahnriemen – Stützschiene einstellt, sondern von verschiedenen Bedingungen abhängt. Sowohl Flächenpressung, Geschwindigkeit als auch Oberflächenrauheit beeinflussen die Reibungszahlen. Die Ergebnisse der Langzeituntersuchungen zeigen, dass sich der Reibwert wesentlich mit fortschreitender dynamischer Belastung ändert. Diese Veränderungen sind in ihren Absolutwerten deutlich größer als die Reibwertänderung auf Grund technologischer oder konstruktiver Bedingungen.

Der Reibwertverlauf an Schichtholzgleitschienen zeigt ein schnelles Ansteigen der Reibwerte innerhalb von 24 Stunden auf Werte von  $\mu > 0,4$ , die Ausbildung eines Plateaus mit Ablagerung eines Polymerfilms auf der Gleitfläche und mit weiterer dynamischer Belastung fortschreitender Verschleiß der Gewebeschicht am Zahnriemen verbunden mit Reibwertsteigerungen. Nach Erreichen eines entsprechenden Verschleißzustandes am Gewebe stellen sich Reibwerte analog der Erkenntnisse mit unbeschichteten Zahnriemen ein. Ein abrasiver Verschleiß der freigelegten PU-Zahnriemenköpfe wie bei den Versuchen mit unbeschichteten Zahnriemen ist nicht feststellbar.

Grund dafür ist die ausgebildete Polymerschicht auf der Gleitschiene, welche einen direkten Kontakt mit dem Zahnriemen verhindert und eine Paarung Polymer gegen Polymer realisiert. Eine Tendenz von niedrigeren Reibwerten bei geringeren Gleitgeschwindigkeiten ist erkennbar.

Schichtholzproben mit einer einmaligen Schmierung aus PTFE-Partikeln zeigen über einen langen Zeitraum deutlich niedrigere Reibwerte trotz höherer pv-Werte. Nach 90 Tagen werden Reibwerte von  $\mu = 0,5$  noch nicht erreicht. Ein Verschleiß des Gewebes wird nicht verhindert, jedoch verzögert.

PAZ-Zahnriemen in Verbindung mit Stahlgleitschienen erreichen im Geschwindigkeitsbereich von 0,5 m/s bis 1,5 m/s und einer Flächenpressung von 0,016 N/mm<sup>2</sup> nach ca. 24 Stunden Reibwerte von  $\mu = 0,5$ , welche nach ca. 10 Tagen Belastungsdauer weiter auf Werte von  $\mu = 0,6$  ansteigen. Dabei ist ein deutlicher Verschleiß an der Gewebebeschichtung der Zahnriemen zu verzeichnen. Sowohl auf der rauen Oberfläche (Rz 25) als auch auf der geschliffenen Oberfläche (Rz 6,3) bildet sich ein geschlossener Polymerfilm aus.

Die Reibwerte für Paarung PAZ-Zahnriemen in Verbindung mit PE-UHMW-Gleitschienen im Dauerversuch bewegen sich in einem Bereich von  $\mu = 0,4$  bis  $\mu = 0,6$  und werden auch nach einer Versuchsdauer von 150 Tagen nicht überschritten. Abhängig vom pv-Wert steigen die Reibwerte stetig bis zum Erreichen des stabilen Niveaus an. Auf der PE-UHMW-Gleitfläche bildet sich eine schuppige Ablagerung aus Polymerpartikeln des Zahnriemens. Ein Verschleissen der Gleitflächen in Form von Materialverlust ist nicht festzustellen.

Auf geschliffenen Aluminiumgleitschienen (Rz 4) lagert sich innerhalb von 24 Stunden ein geschlossener Polymerfilm an. Verschleiß an der Gleitschiene ist nicht festzustellen. Die Reibwerte steigen auf stabile Werte von  $\mu = 0,7$ . An überfrästen Aluminiumgleitschienen (Rz 25) steigt der Reibwert innerhalb von 20 Tagen auf Werte von  $\mu = 0,7$ . Dieser weniger steile Anstieg ist mit dem Verschleiß der Rauheitsspitzen und dem langsameren Aufbau der Polymerschicht zu erklären. Teilweise findet an dieser Oberfläche der Gleitschiene ein Verschleiß bis zur vollständigen Abtragung der Fräsriefen mit anschließender Ausbildung der Transferschicht statt. Die Gewebeschicht an der rauen Gleitfläche verschleißt stark bis zur vollständigen Auflösung des Gewebes. Die sich ausbildenden Reibwerte von  $\mu = 0,7$  ergeben sich dann aus der Paarung Transferschicht – PU-Material.

Bei einer Geschwindigkeit von  $v = 0,5$  m/s und einer Flächenpressung von  $p = 0,012$  N/mm<sup>2</sup> steigt der Reibwert der Paarung PAZ-Zahnriemen an PA6 G Öl innerhalb von 4 Tagen auf Werte von  $\mu = 0,7$ , um nach Erreichen dieses Maximums auf Werte von  $\mu = 0,5$  mit steigender Tendenz bei fortlaufender dynamischer Belastung aufzuweisen. Eine Vermutung für das Absinken des Reibwertes ist eine thermische Aktivierung und Freisetzung von Gleitstoffen aus dem Polyamid. Der im weiteren Verlauf stetige Anstieg der Reibwerte deutet auf einen Verbrauch der Gleitstoffe



hin. Der hohe Reibwert der Gleitpaarung PA6 Gleitschiene und PA-beschichteter Zahnriemen kann mit der hohen Adhäsionsarbeit, gemessen von Erhard [ERH80], erklärt werden.

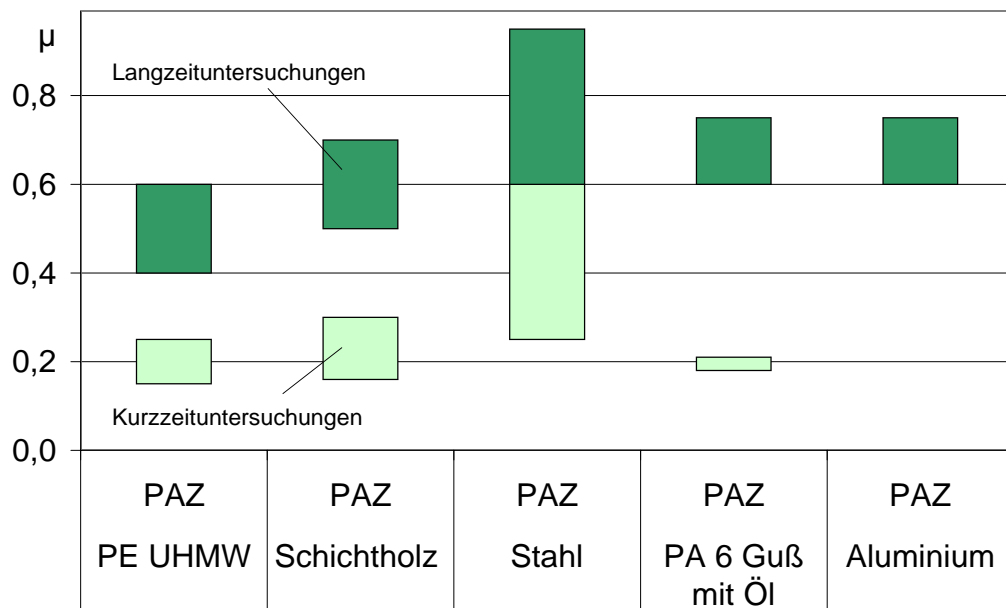


Abbildung 5.96: Gleitreibungszahl für ausgewählte Paarungen

Die Ergebnisse der Reibwertuntersuchungen an polyamidbeschichteten Zahnriemen im Gleitkontakt mit ausgewählten Stützschiene ist in Abbildung 5.96 dargestellt. Zum Vergleich sind die Reibwerte aus den Kurzzeituntersuchungen beigegefügt. Eine Erhöhung der Werte ist bei allen Paarungen deutlich. Der Anstieg der Reibwerte begründet sich bei allen Paarungen bis auf PA6G Öl durch die Ausbildung einer Polymerschicht auf der Gleitfläche der Stützschiene. Ein Gewebverschleiß an Zahnriemen aus der Paarung mit PE-UHMW- Gleitschiene ist nicht feststellbar. An Schichtholz, Stahl- und Aluminiumgleitschiene erfolgt eine Schädigung des Gewebes bis hin zur vollständigen Auflösung in Abhängigkeit von der Belastung und der Einwirkdauer.

An Aluminiumgleitschienen wurden keine Untersuchungen im Kurzzeitversuch durchgeführt, die Ergebnisse aus den Daueruntersuchungen zeigen jedoch ein ähnliches Verhalten wie Stahlgleitschienen.

### 5.5.3 Thermisches Verhalten

Die Entwicklung der Kontakttemperaturen im instationären Bereich bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes von erzeugter Reibungswärme und abgeführter Wärme, lässt sich mit den Gleichungen 3.8 und 3.9 bei bekannten Parametern beschreiben. Da technische Einrichtungen meist nicht den Idealbedingungen der Thermodynamik entsprechen, sind für komplexe Gebilde experimentelle Untersuchungen notwendig.

Die für die meisten Betrachtungen notwendige Endtemperatur (eingeschwungener Zustand) des stationären Bereiches lässt sich ebenfalls mit den Gleichungen 3.8 und 3.9 mit  $t = \infty$  theoretisch berechnen. Die Unkenntnis der Werte für die entsprechenden Parameter sowie der Wärmeleit- und Strömungsverhältnisse gestattet auch hier nur eine Abschätzung der zu erwartenden Kontakttemperatur.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Kontakttemperatur bei allen untersuchten Paarungen mit steigenden eingebrachten Reibleistungen ebenfalls steigen. Der Anstieg zeigt einen degressiven Verlauf. Werden die Schichtstärken der Gleitschienen erhöht bzw. eine Isolierschichten verschiedener Dicke an die Stahlgleitschiene angefügt, so erfolgt die Temperaturerhöhung mit gleichen prinzipiellen Verlauf, jedoch auf höherem Niveau.

Die Empfehlung einer maximalen Kontakttemperatur von 60° Celsius gilt für alle untersuchten Paarungen, da oberhalb dieser Grenztemperatur mit verstärktem Verschleiß und instationärem Verhalten zu rechnen ist. Besonders Gleitschienen aus PE-UHMW können bei überschreiten dieser Temperaturgrenze aufschmelzen, was meist zum Totalausfall des Systems führt.

Treten bei der Beanspruchung von PE-UHMW-Gleitschienen im Kontaktbereich Temperaturen von über 60 °C auf, kann es zu einem plötzlichen Anstieg der Kontakttemperaturen kommen. Dies kann zum einen auf Reibwerterhöhungen und damit größeren Reibleistungen zurückgeführt werden, zum anderen kann es in mikroskopischen Kontaktflächen zu hohen lokalen Temperaturerhöhungen (Blitztemperaturen) kommen. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Polyethylens kommt es zu einem Wärmestau. Dies kann zum Aufschmelzen der Gleitschiene führen. Wird die Paarung weiter betrieben, kann es in Folge weiterer Temperaturerhöhungen zum Aufschmelzen der Gewebeschicht des Zahnriemens kommen.

Kontakttemperaturen oberhalb von 60 °C sollten auch bei thermisch unempfindlichen Gleitschienen (Stahl, Aluminium und Holz) vermieden werden, da ein verstärkter Verschleiß und ein instabiles Laufverhalten durch die thermische Empfindlichkeit der PA-Beschichtung und lokalen Temperaturspitzen gegeben ist.

## 6 Berechnungsansätze

### 6.1 Reibwertentwicklung an PE- Gleitschienen

Die Entwicklung der Reibwerte an PE-UHMW- Gleitschienen an PAZ- Zahnriemen erfolgt in Abhängigkeit der Lauflänge charakteristisch. Mit steigendem pv- Wert steigt der Reibwert der Paarung innerhalb einer kürzeren Lauflänge auf ein erhöhtes Reibwertniveau (Abbildung 6.1).

Wird die Wegstrecke bis zum Ansteigen der Reibwerte über  $\mu = 0,25$  mit dem pv-Wert für alle durchgeführten Dauerversuche graphisch dargestellt, so ergibt sich die Darstellung nach Abbildung 6.2. Der Grenzwert von  $\mu = 0,25$  wurde in dieser Höhe gewählt, da oft in Dimensionierungsvorschriften bzw. Tabellenwerten dieser Wert als oberer Richtwert angegeben wird. Mit zunehmender eingebrachter Reibleistung verringert sich jedoch die Laufleistung der Paarung mit niedrigen Gleitreibwerten.

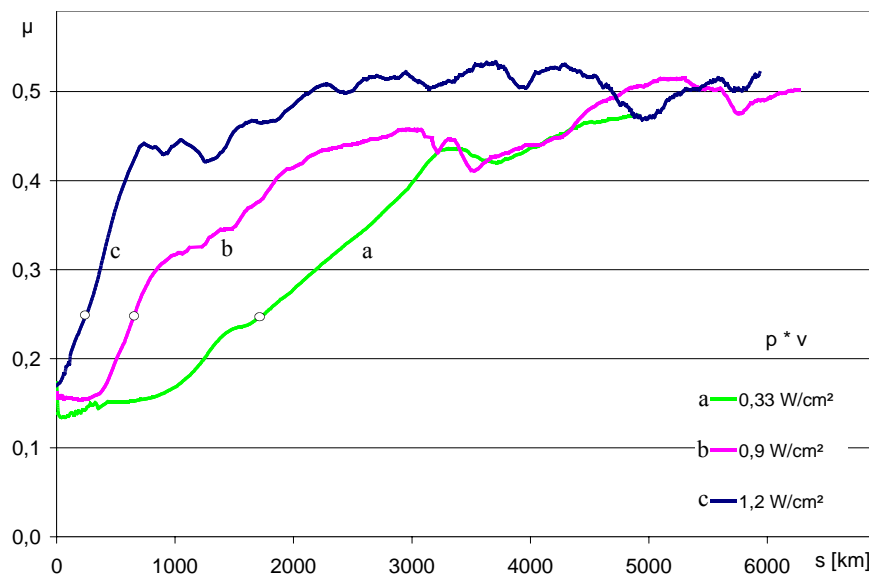


Abbildung 6.1: Reibwertentwicklung an PE-UHMW- Gleitschienen - PAZ-ZR

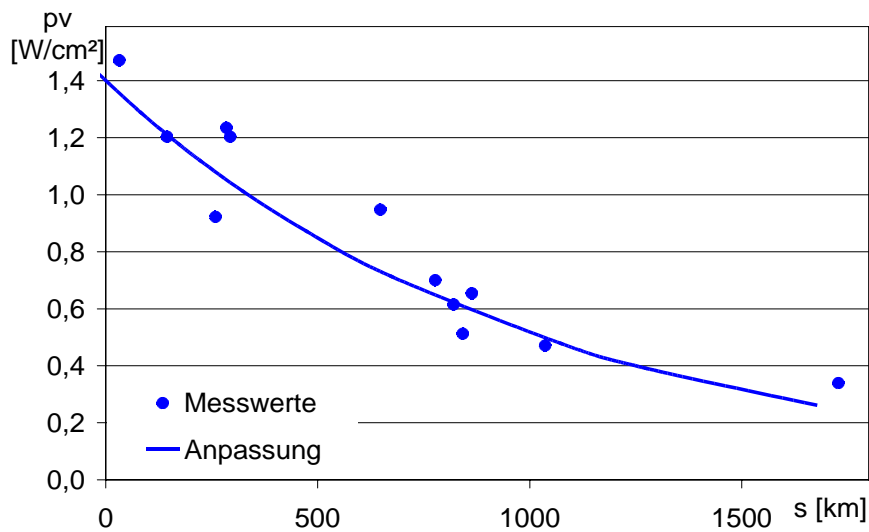


Abbildung 6.2: Weg bis zum Anstieg der Reibwerte auf  $\mu = 0,25$  an PE-UHMW-Gleitschienen

Sind entsprechende Anlagen länger bei einer entsprechenden Belastung im Einsatz, so sind für die sichere Dimensionierung die deutlich höheren Gleitreibwerte für den Langzeiteinsatz in Höhe von  $\mu = 0,45$  bis  $\mu = 0,6$  zu verwenden.

Die Exponentialfunktion:

$$p \cdot v = 1,4 \cdot e^{-0,001 \cdot s} \quad (6.1)$$

$p \cdot v$  [W/cm²],  $s$  [km]

beschreibt den Zusammenhang zwischen  $p \cdot v$ -Wert und Gleitweg  $s$  bis zum Erreichen eines Reibwertes von  $\mu = 0,25$ . Liegt der  $p \cdot v$ -Wert der Paarung über 1,4 W/cm² ist mit einem sehr schnellen Ansteigen des Reibwertes zu rechnen. Die Auslegung entsprechender Anlagen sollt mit dem Höheren Reibwert für den Dauereinsatz erfolgen.

Durch Umformen der Gleichung kann die Wegstrecke bis zum Erreichen des Reibwertes von  $\mu = 0,25$  ermittelt werden

$$s = -1000 \cdot \ln(p \cdot v) + 336 \quad (6.2)$$

$p \cdot v$  [W/cm²],  $s$  [km]

Die Berechnung der Lauflänge bis zum Ansteigen der Reibwerte kann bei hohen  $p \cdot v$ - Werten bzw. bei einem geplanten Dauereinsatz der Anlagen unterbleiben, da der Nutzungsdauer bzw. das Wechselintervall für Zahnriemen und Stützschiene über den berechneten Wert liegen sollte. In diesem Fall muss für die Dimensionierung der Dauerreibwert verwendet werden (Abbildung 5.96).

## 6.2 Berechnung der Kontakttemperatur

Nach den theoretischen Betrachtungen ist die Kontakttemperatur linear von der eingebrachten Reibleistung abhängig, wenn von einem konstanten Wärmeabgabefaktor  $k$  ausgegangen wird:

$$\Delta T = \frac{p_N \cdot \mu \cdot v}{k} \quad (6.3)$$

Diese Vereinfachung wird oft angenommen, da ein konstanter Wärmedurchgangskoeffizient für viele Anwendungsfälle als ausreichend angesehen wird bzw. eine genaue Bestimmung für konkrete Anwendungsfälle nicht möglich ist [CIC90, GRI90, MÄU02, MAR97, MÜL03, WEN65]. Er wird experimentell bestimmt und gilt dann für die entsprechende Anlage im festgelegten Belastungsbereich.

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  ist eine Funktion der Wärmeleitzahl  $\lambda$ , der Schichtstärken  $s$  der Kontaktmaterialien und der Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  (Gleichung (6.4)). Die Schichtstärke ist konstruktiv festgelegt und die Wärmeleitzahl ändert sich nur geringfügig im untersuchten Temperaturbereich.

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1}} + \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{s_2}{\lambda_2}} = k \quad (6.4)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  beeinflusst den Wärmeübergang und ist abhängig von den Konvektionsbedingungen an der Oberfläche (siehe Gleichung (6.5)). Durch eine Änderung der Temperaturdifferenz ändert sich die freie Konvektion und damit der Wärmeübergangskoeffizient [WAG93, HER00].

$$\alpha_{FK} = a \cdot \sqrt[b]{\frac{\Delta T}{c}} \quad (6.5)$$

$a, b, c$  abhängig von den geometrischen und thermischen Bedingungen

In den Abbildungen 5.88, 5.89 und 5.90 zeigt sich, dass die Kontakttemperatur mit steigender Reibleistung zunimmt. Die Zunahme der Kontakttemperatur ist jedoch nicht linear, sondern entspricht dem Charakter einer Potenzfunktion mit einem Exponenten kleiner 1. Dieser degressive Temperaturanstieg resultiert aus einem größeren Wärmeübergang bei höheren Temperaturdifferenzen zwischen Oberfläche und Umgebung.

Die Messergebnisse der Kontakttemperatur im stationären Zustand für unterschiedliche Paarungen bei unterschiedlichem konstruktiven Aufbau und verschiedenen Belastungen zeigen auf, dass

der nichtlinearer Zusammenhang zwischen Reibleistung und Kontakttemperatur mit einer Potenzfunktion der Form:

$$\Delta T = a \cdot (p \cdot \mu \cdot v (b \cdot s + c))^d \quad (6.6)$$

Gleitgeschwindigkeit  $v$  [m/s], Schichtdicke der Gleitschiene/ Isolierung  $s$  [mm], projizierte Flächenpressung  $p$  [N/m<sup>2</sup>]

beschrieben werden kann..

Aus der empirischen Anpassung erhält man für die materialabhängigen Konstanten die Werte nach folgender Tabelle:

*Tabelle 6.1: Werte für die Anpassung : PA-beschichtete Zahnriemen*

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
PE-UHMW	1	0,0015	0,03	0,65
Schichtholz	1	0,005	0,125	0,55
Stahl+PE-Isolierung	1	0,007	0,2	0,5

Die Konstante  $a$  ist eine maschinenspezifische Konstante, die entsprechend der Wärmeleit- und Konvektionsbedingungen der Fördereinrichtung bestimmt werden muss. Bei geringer Wärmeabfuhr und Einhausungen ist dieser gegebenenfalls zu erhöhen, bei Zwangskonvektion abzusenken. Da die Kontakttemperatur im Wesentlichen durch die Wärmeleitfähigkeiten der beteiligten Gleitpartner bestimmt wird, ist nur mit einer geringen Abweichung dieses Faktors von 1 zu rechnen.

Die Anpassungswerte für die Ermittlung der Kontakttemperatur wurden so gewählt, dass die berechneten Temperaturen im Bereich der höchsten gemessenen Werte liegen. Ziel war es nicht, den Mittelwert oder eine Ausgleichsfunktion für alle Messwerte zu finden, sondern die Temperatur des stationären Zustandes zu ermitteln.

Für die Gleitschienen PE-UHMW und Schichtholz wurden jeweils die Gleitschienenendicke für die Untersuchungen herangezogen.

Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der Stahlstützschienen ist eine gleichmäßige Temperaturverteilung mit geringem Gradienten über die gesamte Materialdicke der Gleitunterstützung festzustellen. Verschiedene Materialdicken wirken sich nur sehr gering auf die Kontakttemperatur aus. Bei Gleitschienen aus Stahl wurden deshalb verschiedene Isolierschichten aus PE-UHMW zwischen Kontaktfläche und Massestück eingefügt. Diese Anordnung entspricht einer isolierten Befestigung der Stützschiene in Maschinenkonstruktionen (vergl. Abbildungen 4.8 und 4.9). Die Angabe für die Schichtdicke in der Gleichung bezieht sich auf die PE-Isolierschicht.

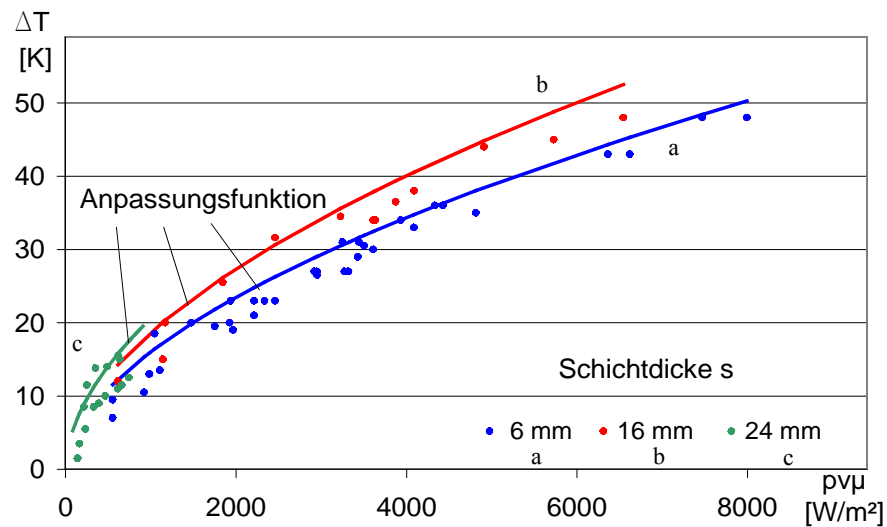


Abbildung 6.3: Messwerte und Anpassungsfunktion Holz - PAZ ZR

Die graphische Darstellung der Kontakttemperaturerhöhung über der Reibleistung pro Fläche für die Paarungen PAZ-Zahnriemen gegen Holz-, PE-UHMW- und Stahlgleitflächen ist in den Abbildungen 6.3, 6.4 und 6.6 mit den dazugehörigen Anpassungsfunktionen zusammengestellt. In den Diagrammen sind jeweils die gemessenen Werte für die Temperatur bei entsprechender Reibleistung dargestellt. Die Funktionen geben den berechneten Wert für die entsprechende Reibleistung und Schichtstärke an.

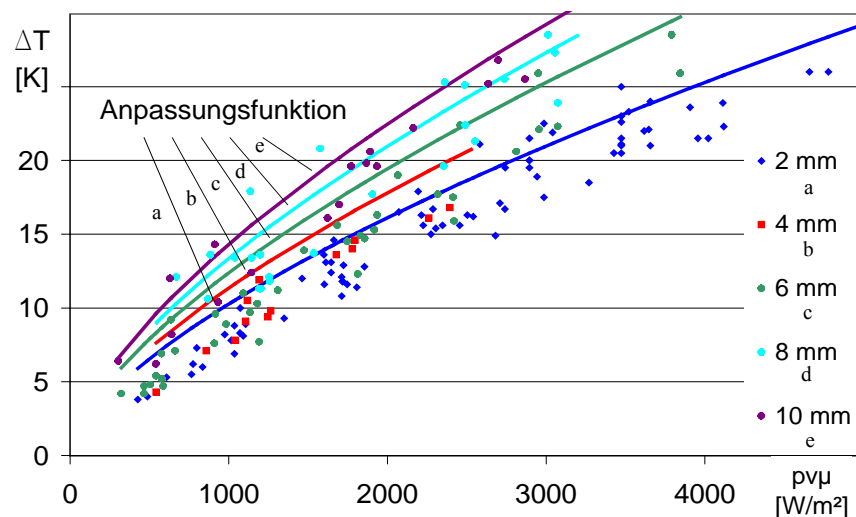


Abbildung 6.4: Messwerte und Anpassungsfunktion PE-UHMW – PAZ ZR

Die ermittelte Potenzfunktion beschreibt die Temperatur für Schichtholz in den Materialdicken von 6 mm und 16 mm über einen weiten Reibleistungsbereich sehr gut (Abbildung 6.3). Für die Materialdicke von 24 mm standen Messwerte nur für geringe Reibleistungen zur Verfügung, die Anpassung mit den entsprechenden Parametern zeigt eine gute Übereinstimmung.

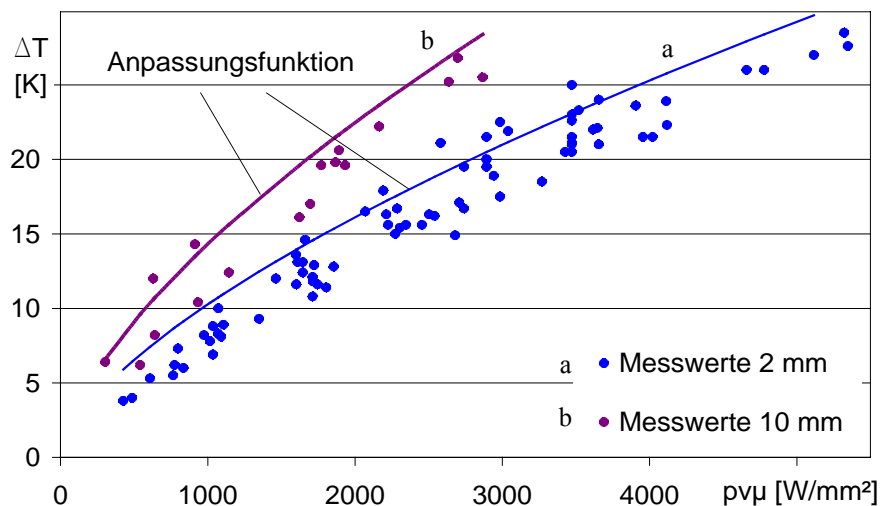


Abbildung 6.5: Kontakttemperaturen PE-UHMW- PAZ-ZR, 2 mm und 10 mm

Die Gesamtheit aller Messwerte für die Paarung PE-UHMW – PAZ-Riemen ist in Abbildung 6.4 abgebildet. Die Messwerte für die Kontakttemperatur im untersuchten Materialdickenbereich lässt sich sehr gut mit der empirischen Anpassung abbilden.

Für eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse wurden die Werte für 2 mm und 10 mm in ein separates Diagramm eingefügt (Abbildung 6.5). Die Berechnung der Kontakttemperaturen durch die Anpassungsfunktion zeigt eine gute Abbildung der Messwerte.

Die Messwerte und die Anpassungsfunktion für die Paarung Stahl – PAZ-Zahnriemen sind in Abbildung 6.6 dargestellt.

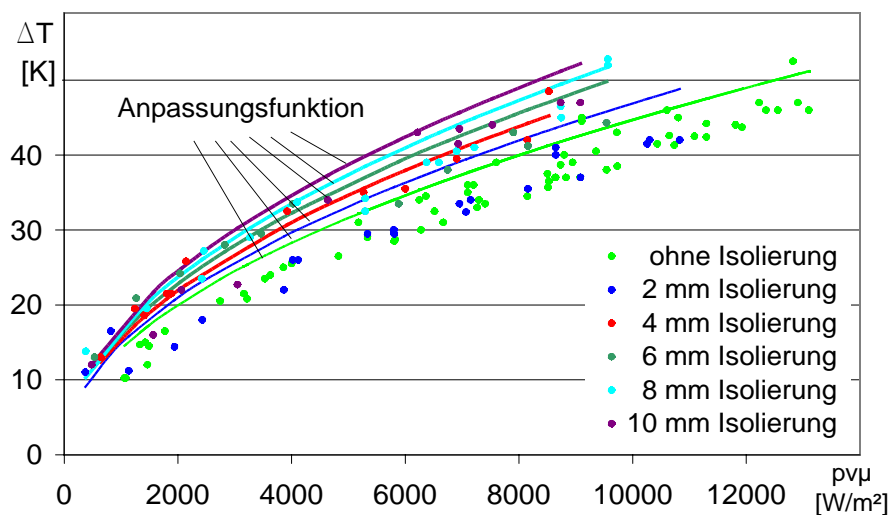


Abbildung 6.6: Kontakttemperaturen Stahl- Stützschiene - PAZ-ZR

Die Temperaturen für Messungen ohne Isolierschicht haben die niedrigsten Werte, da der Wärmestrom durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Stahls gut von der Wirkstelle abgeführt werden



kann. Werden Isolierschichten von 2 mm bis 10 mm stufenweise eingebracht, erhöht sich die Temperatur in der Kontaktstelle mit zunehmender Isolierung (Abbildung 6.6). Für eine bessere Darstellung wurden die Werte für eine Stahlgleitpaarung ohne PE-Isolierung und mit einer 10 mm Isolierung abgebildet (Abbildung 6.7). Die Messpunkte für die Kontakttemperaturen liegen mehrheitlich unterhalb der Anpassungsfunktion. Die wenigen Messpunkte mit höheren Temperaturen als berechnet überschreiten den berechneten Wert um maximal 3 Grad.

Die Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Kontakttemperaturen ist für die ausgewählten Gleitschienenmaterialien (PE-UHMW, Schichtholz, Stahl) bei unterschiedlichen Schichtstärken sehr gut.

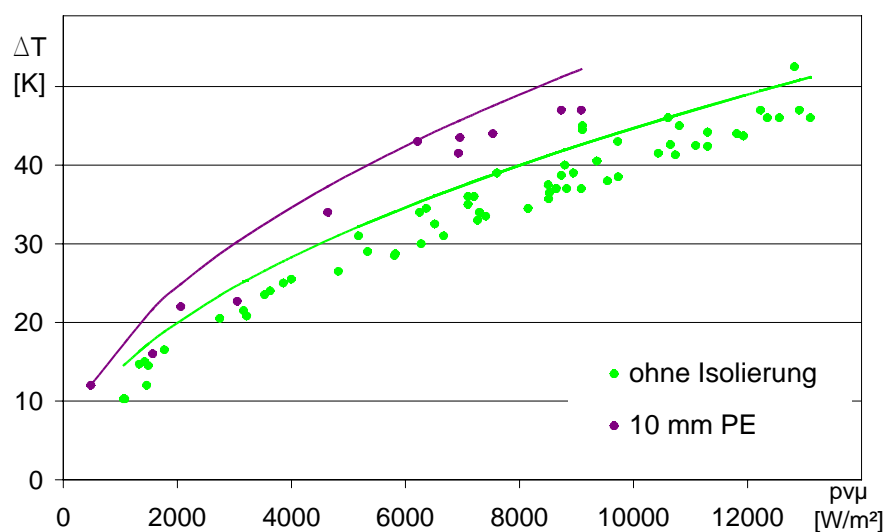


Abbildung 6.7: Stahl, ausgewählte Paarungen

### 6.2.1 Berechnungsmodell der Grenzbelastung bei ausgewählten Paarungen

Abgeleitet aus den Ergebnissen der Kurzzeitversuche und der Langzeituntersuchungen kann die Kontakttemperaturerhöhung mit der Gleichung (6.6) ermittelt werden. Die maximal zulässige Kontakttemperaturerhöhung berechnet sich nach:

$$\Delta T_{zul} = T_{zul} - T_u \quad (6.7)$$

und ist abhängig von der zulässigen Kontakttemperatur und der Umgebungstemperatur.

Die Kontakttemperatur sollte 60° C nicht überschreiten. Insbesondere bei PE-UHMW kann es durch Entstehen von Blitztemperaturen zum plötzlichen weiteren Ansteigen der Temperatur und damit zur thermischen Zerstörung der Paarung kommen.

Die Ermittlung der tatsächlich vorhandenen Reibwerte sollte nach einer entsprechenden Einlaufzeit am vorhandenen Förderer erfolgen. Für PE-Gleitschienen kann die Formel (6.2) für die Abschätzung der Wegstrecke bis zum deutlichen Reibwertanstieg verwendet werden. Besteht nicht die Möglichkeit der Reibwertmessung, sollte auf die Ergebnisse der Reibwertuntersuchungen aus den Langzeitversuchen zurückgegriffen werden (Abbildung 5.96). Diese Höhe der ermittelten Reibwerte liegt deutlich über den meisten Angaben in Auslegungsvorschriften und Tabellenbüchern, berücksichtigen jedoch die realen Verhältnisse an der tribologischen Paarung mit dem entsprechenden Verschleiß- und Materialübertragungsverhalten.

Die Fördergeschwindigkeit wird als konstanter Wert angenommen. Sind prozessbedingt Geschwindigkeitsschwankungen vorhanden, sollte die maximale Geschwindigkeit zur Berechnung herangezogen werden. Für diskontinuierliche Prozesse im Aussetzbetrieb sollte ebenfalls der Geschwindigkeitswert voll angerechnet werden, da die größten Steigerungen der Temperatur unmittelbar nach Beginn des Förderprozesses eintreten. Insbesondere bei Gleitschienen mit niedrigen Wärmeleitzahlen  $\lambda$  besteht die Gefahr der thermischen Unterdimensionierung bei Verwendung von Abschlügen für die Geschwindigkeit (siehe auch Abbildung 5.81).

Für die Ermittlung der Flächenpressung wird die Masse des Transportgutes und die projizierte Standfläche herangezogen. Werden die Transportgüter mit Abstand gefördert, kann die Masse der gleichzeitig geförderten Güter und die überstrichene Fläche für die Ermittlung der Pressung verwendet werden.

Für eine erste Abschätzung der thermischen Einsatzgrenze für bestimmte Stützschiene Materialien kann der pv-Wert für eine konkrete, zulässige Kontakttemperaturerhöhung, unter Verwendung der zu erwartenden Reibwerte bei Dauerbelastung dienen (Abbildung 6.8).

Die größten zulässigen pv-Werte werden mit Stützschiene aus 2 mm PE-UHMW erreicht. Dies lässt sich mit dem relativ geringen Wärmewiderstand und der geringeren Reibleistung durch niedrigere Reibwerte im Dauerversuch ( $\mu = 0,5$ ) erklären. Im Gegensatz dazu ist der zulässige pv-Wert für PE-Gleitschienen mit einer Materialstärke von 10 mm (entspricht dem gebräuchlichen Einsatz nach Abbildung 2.10) im Bereich von Stahlgleitschienen ohne thermische Isolierung, trotz der deutlich höheren zu erwartenden Reibwerte an Stahlgleitschienen.

Dünne Schichtholzgleitschienen (6 mm) bewegen sich mit ihrem zulässigen pv-Wert auf Grund der höheren Reibwerte unterhalb der Werte für PE-UHMW und der Stahlgleitflächen. Stahlgleitflächen mit einer 5 mm PE-Isolierung weisen die geringsten pv-Werte auf. Ursache sind der hohe Wärmewiderstand und die hohe Reibleistung.

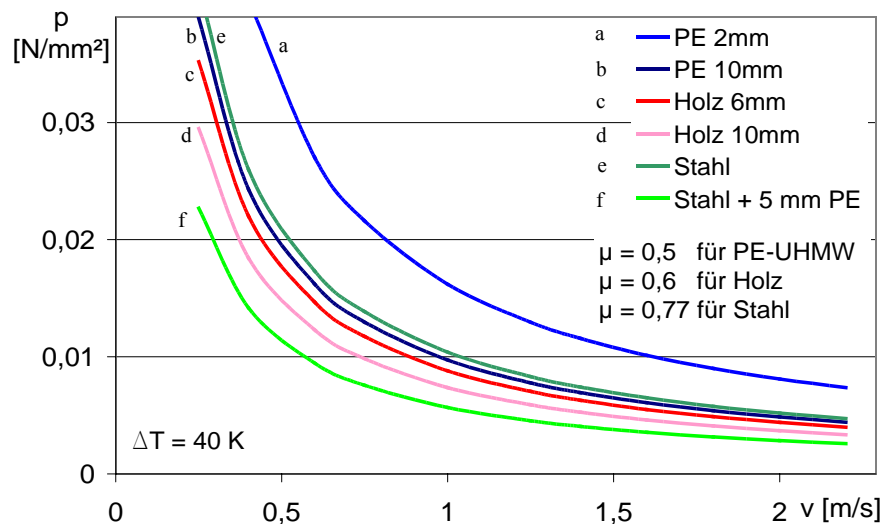


Abbildung 6.8: Zulässige pv-Werte für wichtige Paarungen

In Abbildung 6.9 ist die berechnete Grenzbelastung für PE-UHMW Gleitschienen für  $\Delta T = 40\text{ K}$  und  $\mu = 0,5$  (Reibwert für Dauerbelastung) sowie die Punkte für thermisch zerstörten PE-UHMW-Gleitschienen aus Versuchen für verschiedene Schichtdicken dargestellt.

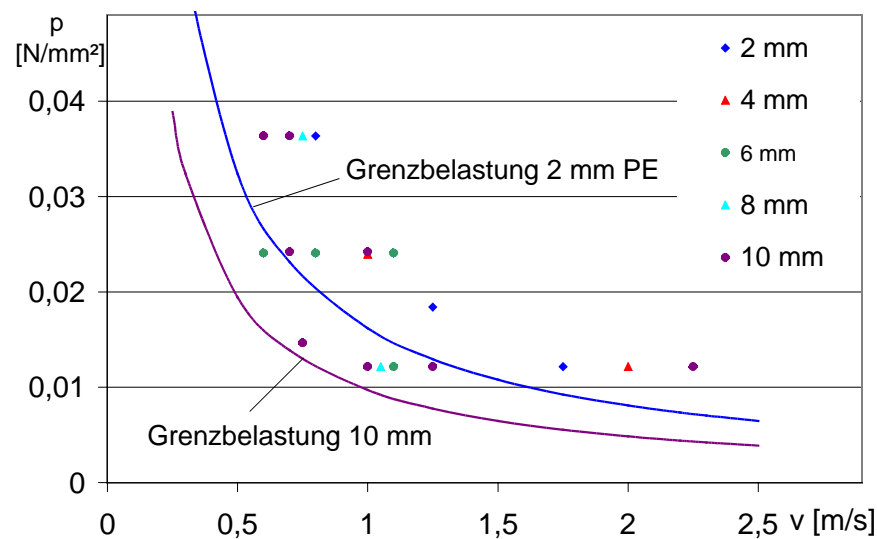


Abbildung 6.9: Thermische Zerstörung PE-UHMW an verschiedenen Materialdicken

Die realen Werte für Geschwindigkeit bzw. Flächenpressung für zerstörte Gleitschienen befinden sich für alle Versuche außerhalb der berechneten Grenzkurven. Die Zerstörung von Gleitschienen deutlich oberhalb der Grenzkurve resultiert aus dem niedrigeren vorhandenen Reibwert für die reale Paarung und damit niedrigerer Reibleistung. Die Grenzkurve wurde mit dem höheren Reibwert für Dauerbelastungen gerechnet.

Die Verwendung der maximalen pv-Werte bzw. die Berechnung der Kontakttemperatur hätte in allen Fällen eine thermische Zerstörung verhindert.

## 6.2.2 Berechnungsbeispiel

In Anlage 1 ist ein Berechnungsbeispiel für einen Doppelgurtförderer für Werkstückträger aufgeführt. Die Berechnung erfolgt nach den Unterlagen der Firma Forbo Siegling GmbH, Hannover [FOR07]. Die Dimensionierung nach den Auslegungsvorschriften anderer Hersteller ergeben vergleichbare Resultate.

Es werden Werkstückträger mit einer Masse von 5,5 kg mit einer Geschwindigkeit von 1,5 m/s gefördert. Die Anzahl der Werkzeugträger beträgt bei einem Achsabstand von 5 Metern 50 Stück. Die Rechnung wurde sowohl mit einer PE-Unterstützung als auch mit einer Stahlunterstützung durchgeführt.

Reibungszahlen nach Tabelle:  $\mu = 0,3$  für Stahl und  $\mu = 0,25$  für Kunststoff

Nach den Berechnungsunterlagen wurden zwei Zahnriemen T 10 Breite 25 mm gewählt.

Die errechneten Sicherheiten betragen für die

Zahnfußsicherheit: Stahl: 1,1

PE 1,3

Zugstrangsicherheit: Stahl: 1,5

PE: 1,7

Die berechneten Kontakttemperaturen nach Gleichung (6.6) mit den oben genannten Parametern betragen:

Stahlgleitfläche: 53 °C

PE-Gleitfläche: 51,5 °C

bei einer Raumtemperatur von 22 °C.

Die Sicherheiten für Zahnfußfestigkeit und Zugstrangfestigkeit liegen sowohl bei Stahl- als auch bei PE- Gleitabstützungen über 1. Damit erfolgt eine sichere Auslegung. Die zu erwartenden Kontakttemperaturen bewegen sich im zulässigen Bereich.

Für die Berechnung der Wegstrecke bis zum Überschreiten der  $\mu = 0,25$  Grenze bei PE- Gleitschienen und damit der Verwendung des Reibwertes aus den Dauerversuchen erfolgt mit Gleichung (6.2). Da der pv- Wert mit 1,6 W/cm<sup>2</sup> über dem Grenzwert von 1,4 W/cm<sup>2</sup> liegt, kann auf eine Berechnung verzichtet werden und der Reibwert aus den Dauerversuchen findet Verwendung.

Werden für die Berechnung die ermittelten Reibwerte aus den Dauerversuchen (Abbildung 5.95 Stahl  $\mu = 0,75$ , PE-UHMW  $\mu = 0,5$ ) verwendet ergeben sich folgende Ergebnisse:

Zahnfußsicherheit:	Stahl:	0,7
	PE	1,0
Zugstrangsicherheit:	Stahl:	0,4
	PE:	0,7
Kontakttemperaturen:	Stahlgleitfläche:	71° C
	PE-Gleitfläche:	68 °C

Die Zahnfußsicherheit für Stahlgleitschienen und die Zugstrangsicherheit für Stahl- und PE-Gleitschienen liegen unter 1. Ein sicherer Betrieb der Anlage ist nicht gewährleistet.

Auf Grund der hohen erzeugten Reibleistung überschreitet die Kontakttemperatur sowohl an der Stahl- als auch an der PE- Gleitschiene die zulässigen Werte.

Die Fördereinrichtung für Werkstückträger ist mit den bisherigen Auslegungsgrundlagen ausreichend dimensionierte. Die Ermittlung der Kontakttemperatur der Gleitabstützung mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methode ergibt mit den empfohlenen Reibwerten zulässige Werte.

Die Einbeziehung der Ergebnisse aus den Langzeituntersuchungen mit den entsprechenden Reibwerten ergibt sowohl bei den PE-UHMW als auch bei den Stahlgleitschienen eine nicht ausreichende Zahnfuß- und Zugstrangsicherheit. Die zu erwartenden Kontakttemperaturen bewegen sich außerhalb des zulässigen Bereiches. Insbesondere an der thermisch empfindlichen PE-UHMW- Gleitschiene sind Schäden in Form von Aufschmelzungen zu erwarten.

Für die Dimensionierung von Zahnriemenfördereinrichtungen ist sowohl für die Zugstrangfestigkeit, die Zahnfußfestigkeit als auch zur thermischen Auslegung der sich einstellende höhere Reibwert bei Dauerbelastung anzuwenden.



# 7 Zusammenfassung und Ausblick

## 7.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, grundlegende Erkenntnisse über das Reibungs- und Verschleißverhalten von Zahnriemen- Stützschieneanpaarungen in Verbindung mit den thermischen Zusammenhängen in solchen Systemen zu erarbeiten und damit die vorhandenen Dimensionierungsgrundlagen für Zahnriemenförderer wesentlich zu verbessern.

Als wichtigster Kennwert für die Auslegung von Zahnriemenförderern konnte der Reibwert definiert werden. Dieser ist neben dem direkten Einfluss auf die notwendige Antriebsleistung und die mechanische Grenzbelastung des Riemens auch für die Erwärmung des Systems von maßgeblicher Bedeutung. Aus dem Stand der Technik sowie eigenen Voruntersuchungen ist jedoch bekannt, dass der Reibwert von polymeren Gleitpartnern sehr stark von den Belastungsparametern und der Belastungsdauer abhängt und in der Regel deutlich über den Angaben der Hersteller liegt. Unter Verwendung dieser empfohlenen Reibwerte sind somit die verfügbaren Berechnungsgrundlagen, die zudem die reibungsbedingte Systemerwärmung nicht berücksichtigen, unzureichend.

Nach allgemeinen theoretischen Betrachtungen zur Tribologie und zu thermischen Prozessen wurde das spezielle System Zahnriemen- Stützschiene analysiert. Dabei wurde aufgezeigt, dass mit den bekannten Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik, insbesondere der komplexen Wärmeleitung bzw. Wärmeübertragung und der erforderlichen Material- und Systemkennwerte, keine zuverlässige Aussage über die zu erwartende Erwärmung des betrachteten Systems getroffen werden kann. Damit kann die Zielstellung nur durch eine empirische Lösung erreicht werden.

Im experimentellen Teil der Arbeit wurden Kurz- (bis 8 Stunden) und Langzeituntersuchung (über 7 Tage) an verschiedenen Gleitpaarungen durchgeführt. Dabei wurde nachgewiesen, dass die thermoplastischen Polyurethanzahnriemen in Verbindung mit verschiedenen Stützschieneanmaterialien Bestandteil eines sehr komplexen tribologischen Systems sind. Reibung, Verschleiß und thermisches Verhalten sind systembezogene Größen, welche sich gegenseitig beeinflussen und im Gesamtsystem betrachtet werden müssen. Die Konstruktion eines Versuchsstandes und die Untersuchungen erfolgten so, dass die Versuchsbedingungen der Praxis möglichst nahe kommen.

In den Kurzzeitversuchen wurde zunächst das grundlegende Verhalten von Reibwert-, Verschleiß- und Temperaturentwicklung in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen betrach-

tet. Dabei führte die Untersuchung von unbeschichteten Zahnriemen zu dem Ergebnis, dass diese aufgrund von hohen Reibwerten und Verschleiß nicht oder nur in untergeordneten Anwendungen zum Einsatz kommen sollten.

Die Langzeitversuche belegen, dass die tribologischen Ergebnisse aus den Kurzzeitversuchen nur Anhaltspunkte für das Verhalten der Reibpaarung darstellen. Insbesondere die Reibwertverläufe sind sehr stark zeitabhängig und erreichen erst nach längerer Betriebsdauer einen stationären Wert, der in der Regel deutlich über den bisher zur Dimensionierung verwendeten Reibwerten liegt.

Besondere Aufmerksamkeit wurde der Kontakttemperatur beigemessen, die in einem weiten Geschwindigkeits- und Lastbereich an verschiedenen Paarungen und konstruktiven Aufbauten untersucht wurde. Diese begrenzt die Belastung der tribologischen Paarung und ist ein wichtiges zusätzliches Auslegungskriterium zu den bisherigen Dimensionierungsvorschriften. Im Ergebnis dieser Arbeit wird erstmalig eine empirische Gleichung zur Berechnung der Kontakttemperatur für ausgesuchte praxisrelevante Gleitpaarungen für Zahnriemenförderer vorgestellt. Diese beruht, im Gegensatz zu bekannten Lösungen ähnlicher Problemstellungen (z. B. Erwärmung von Gleitlagern), auf einem nichtlinearen Ansatz, der den bei steigender Reibleistung degressiven Temperaturanstieg unter Berücksichtigung konstruktiver Bedingungen wie Schichtstärke und Material wesentlich besser beschreibt.

Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse zum Reibungs- und Verschleißverhalten in Verbindung mit dem neu entwickelten Modell zur Berechnung der Systemerwärmung können ungeschmierte Zahnriemenfördersysteme unter vorgegebenen technologischen und konstruktiven Bedingungen ausgelegt werden. Insbesondere die bisher vernachlässigte Erwärmung der Gleitpartner, die in der Praxis ein wichtiges Ausfallkriterium darstellt, führt dabei zu einer signifikanten Steigerung der Zuverlässigkeit bei der Dimensionierung solcher Systeme.

## 7.2 Ausblick

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit liefern wichtige Erkenntnisse zum tribologischen Verhalten von Zahnriemen und ihren Abstützungen sowie ein empirisches Modell zur Berechnung der reibungsbedingten Erwärmung. Es wurde nachgewiesen, dass ungeschmierte Zahnriemenfördersysteme mit Hilfe dieser Ergebnisse dimensioniert werden können. Grundlage dafür bilden die Betriebsparameter, der konstruktive Aufbau sowie die experimentell zu bestimmenden Koeffizienten. Da die Versuche nur an ausgewählten Paarungen an einem spezifischen Prüfstand durchgeführt werden konnten, ist die Anwendbarkeit durch weitere Untersuchungen abzusichern bzw. durch die Ermittlung der empirischen Anpassungswerte für andere Werkstoffkombinationen zu erweitern. Dabei sind auch die konkreten Belastungsbedingungen des Förderers mit ein-



zubeziehen, der durch große Gutabstände, unterschiedlich schwere Güter oder wechselnde Geschwindigkeit oftmals nicht gleichmäßig belastet wird.

Die Verbesserung der Wärmeabfuhr aus der Wirkstelle kann sowohl durch eine Verringerung der Dicke der polymeren Gleitschicht als auch durch den Einsatz von Materialien mit höherer Wärmeleitfähigkeit erfolgen. Konstruktive Maßnahmen zur Ausbildung von Kunststoffgleitschienen mit geringen Dicken bei gleichzeitig ausreichender Steifigkeit sollten erfolgen und praxisnah untersucht werden.

Die Untersuchungen beschränkten sich außerdem auf die derzeit am Markt verfügbaren Zahnriemen bzw. Gewebebeschichtungen sowie standardmäßige Gleitschienen. Es wurde festgestellt, dass unbeschichtete Zahnriemen nur sehr bedingt anwendbar sind und auch mit einer Gewebebeschichtung die Reibwerte und der Verschleiß nicht zufrieden stellend gesenkt werden können. In diesem Zusammenhang sind weitere Optimierungen der Paarungen notwendig. Um die Lebensdauer zu verlängern bzw. die Einsatzmöglichkeiten von Zahnriemenförderern zu erweitern, ist insbesondere die dauerhafte Senkung des Reibwertes anzustreben. Dies kann durch eine Veränderung der Beschichtungsmaterialien, z. B. durch Beimischung von PTFE-Fasern in das Gewebe oder durch Gleitstoffe in der Stützschiene, erfolgen. Erste Versuche mit PTFE-Partikeln auf Holzgleitschienen deuten darauf hin, dass sich eine Einmalschmierung langfristig günstig auf die Paarung auswirkt.



# Literaturverzeichnis

- [ACH99] Achenbach, M.; Frank, E.: Reibung von Elastomeren, Tribologie-Fachtagung Göttingen, 1999
- [ALB06] Albers, A.; Deter, L.; Feldhusen, J.; et al.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2006
- [ANI90] Anisimov, V. N.; Kurascenkov, V. N: Einfluss von Betriebsparametern auf Reibung und Verschleiß thermoplastischer Polyurethane, Problemy Trenija i Iznasivanija Kiev Heft 38, 1990
- [BAE06] Baehr, Hans Dieter; Stephan, Karl: Wärme- und Stoffübertragung, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2006
- [BAN79] Bandemer, Hans; Bellmann, Andreas: Mathematik für Ingenieure, BSG B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig, 1979
- [BAR00] Bartel, Dirk: Berechnung von Festkörper- und Mischreibung bei Metallpaarungen, Magdeburg, Dissertation 2000
- [BAU63] Baule, Bernhard: Die Mathematik des Naturforschers und Ingenieurs, S. Hirzel Verlag Leipzig, 1963
- [BER00] Berger, Martin: Untersuchungen an wartungsfreien trockenlaufenden Verbundgleitlagern, Dissertation Magdeburg, 2000
- [BOW59] Bowden, F. P.; Tabor, D.: Reibung und Schmierung fester Körper, Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1959
- [BRE86] Brendel, Horst; Ehrlich, Michael; Junghans, Roland: Beiträge zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Gleitpaarungen im Mischreibungszustand durch Optimierung der Oberflächenrauheit, Rektor der TH K.- M.- Stadt, 1986
- [CHA02] Charkhvorostov, D.: Simultane Bestimmung von Verschleiß, Reibung und Temperatur, Tribologie-Fachtagung Göttingen, 2002
- [CIC90] Cicinadze, Avtandil V.: Polymere Gleitlager, Verlag Technik Berlin, 1990
- [CZI82] Czichos, Horst: Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen, Expert Verlag Grafenau, 1982
- [DAU77] Dautzenberg, Johannes H.: Reibung und Gleitverschleiß bei Trockenreibung, Dissertation Eindhoven, 1977
- [DEH73] Dehne, Wilfried: Untersuchungen über den Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Reibung, Dissertation TU Clausthal, 1973

- [DET75] Detter, Helmut: Berechnungshinweise für Gleitlager im Trockenlauf der Gleitpaarung Kunststoff - Stahl, Schmierungstechnik + Tribologie 22 (1975)
- [DOM08] Domininghaus, Hans: Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2008
- [ERH80] Erhard, Gunter: Zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Polymerwerkstoffen, Karlsruhe, Dissertation 1980
- [ERH85] Erhard, Gunter; Strickle, Erich: Maschinenelemente aus thermoplastischen Kunststoffen, Lager und Antriebselemente, VDI-Verlag GmbH, 1985
- [FAR07] Farrenkopf, Matthias: Poly Chain GT Carbon Technologie Der Leistungssprung bei Zahnriementrieben, 12. Tagung "Zahnriemengetriebe " TU Dresden, 2007
- [FIS95] Fischer, Rolf: Elektrische Maschinen, Carl Hanser Verlag München, 1995
- [FOR07] Firmenschrift: Siegling Proposition - Zahnriemen-Berechnungen, Ausgabe 07/07, Best.-Nr. 202, Forbo Siegling GmbH Hannover, 2007
- [FOR46] Forrest, Mark L.: Power Transmission Mechanism, US Patent 2,397,312, 26.März 1946
- [FRO85] Fronius, Stefan; Holzweißig, Franz: Taschenbuch Maschinenbau, Band 2, VEB Verlag Technik Berlin, 1985
- [GAH90] Zum Gahr, K.-H.: Reibung und Verschleiß bei metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen, DGM-Informationsgesellschaft m.b.H., 1990
- [GOT54] Gotter, Gottfried: Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen, Springer- Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1954
- [GRI90] Grigull, Ulrich; Sandner, Heinrich: Wärmeleitung, Springer- Verlag Berlin, 1990
- [HAH87] Hahn, Walter: Beitrag zur funktionenorientierten kinematischen Struktur- und Maßsynthese, Siegen, Dissertation 1987
- [HAP98] Happ, Burkhard: Die Reibung hochelastischer Stoffe, Tribologie-Fachtagung Göttingen, 1998
- [HEL82] Hell, Friedrich: Grundlagen der Wärmeübertragung, VDI-Verlag Düsseldorf, 1982
- [HER00] Herwig, Heinz: Wärmeübertragung A - Z, Springer-Verlag Berlin, 2000
- [KAF73] Kaffanke, K.; Czichos, H.: Die Bestimmung der Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, 1973
- [KRA82] Kragelski, I. V.; Dobycin, M. N.; Komalov, V. S.: Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß, VEB Verlag Technik Berlin, 1982

- [LÜT84] Lütkebohle, Heinrich: Roll- und Wälzreibung zylindrischer Räder aus thermoplastischen Kunststoffen, Dissertation TU Berlin, 1984
- [MAR97] Marx, Steffen: Trockenlaufende Gleitlager aus hochtemperaturbeständigen Kunststoffen, Dissertation TU Chemnitz, 1997
- [MÄU02] Mäurer, Michael: Tribologische Untersuchungen an Radialgleitlagern aus Kunststoffen, Dissertation TU Chemnitz, 2002
- [MEC07] Gates Mectrol GmbH: Urethane Timing Belts and Pulleys, Pfungstadt, Katalog 2007
- [MÜL03] Müller, Frank: Untersuchungen an wartungsfreien trockenlaufenden Kunststoffgleitlagern, Shaker Verlag Aachen, 2003
- [MUL08] Firmenschrift: Produktkatalog, Mulco-Europe EWIV, Hannover, 2008
- [NAG01] Nagel, Thomas: Problematik Zugstrang in Simulation und Experiment, 6. Tagung "Zahnriemengetriebe " TU Dresden, 2001
- [NAG05] Nagel, Thomas: 10 Jahre Zahnriementagung - 35 Jahre Zahnriemenforschung in Dresden, 10. Tagung "Zahnriemengetriebe " TU Dresden, 2005
- [NEN99] Nendel, K.; Sumpf, J.; Grenzendorfer, D.: Verbesserung des Laufverhaltens von Zahnriemengetrieben mit Hilfe von Silikon-Gleitmittel, Zeitschrift Maschinenmarkt, Würzburg, 1999
- [POL05] Polifke, Wolfgang; Kopitz, Jan: Wärmeübertragung, Pearson Studium, 2005
- [POL82] Polzer, Gottlieb; Meißner, Franz: Grundlagen zu Reibung und Verschleiß, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1982
- [QIA97] Qiao, Linan: Beanspruchung und Wärmeentwicklung in rollenden Rädern aus viskoelastischen Werkstoffen, VDI Verlag Düsseldorf, 1997
- [RIE88] Rieger, Hansjörg: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Gummireibung in einem großen Geschwindigkeits- und Temperaturbereich unter Berücksichtigung der Reibungswärme, München, Dissertation 1988
- [ROO05] Roos, Eberhard; Maile, Karl: Werkstoffkunde für Ingenieure, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2005
- [RUB92] Ruß, August G.: Linearlager und Linearführungssysteme, expert Verlag Ehningen, 1992
- [SCH03] Scheerer, Werner: Vergleich des Reibungs- und Verschleißverhaltens von Stahl - Kunststoff, Tribologie und Schmierungstechnik, 50 ; 5+6, Denkendorf, 2003
- [SON91] Song, Jian: Reibung und Verschleiß eigenverstärkter Polymerwerkstoffe, VDI Verlag Düsseldorf, 1991

- [SUM99] Sumpf, Jens: Grenzbeanspruchung für Rollenketten in der Fördertechnik, Dissertation TU Chemnitz, 1999
- [TAU71] Tautz, Heinz: Wärmeleitung und Temperatenausgleich, Akademie Verlag Berlin, 1971
- [TER05] Terschüren Walter: Erhöhung der Lebensdauer von Zahnriemen durch Verbesserung der Glaskordeigenschaften, 10. Tagung "Zahnriemengetriebe " TU Dresden, 2005
- [UET85] Uetz, Herbert; Wiedemeyer Jochem: Tribologie der Polymere, Carl Hanser Verlag München, 1985
- [UET86] Uetz, Herbert: Abrasion und Erosion, Carl Hanser Verlag München Wien, 1986
- [UHL98] Uhlig, Konrad: Polyurethan-Taschenbuch, Carl Hanser Verlag München, Wien, 1998
- [VDI 2758] VDI Richtlinie 2758: Riemengetriebe, Beuth Verlag GmbH Berlin, 2001
- [WAG93] Wagner, Walter: Wärmeübertragung, Vogel Buchverlag Würzburg, 1993
- [WEN65] Wenger, Erich: Belastungs- und Erwärmungsgrenzen bei Trockenauflagern, Schmierungstechnik 12 Düsseldorf 1965
- [WIT06] Witt, Robert: Belastungsvorgänge im Inneren von Zugsträngen aus Stahllitze, 11. Tagung "Zahnriemengetriebe " TU Dresden, Dresden, 2006

# Anlage

## Berechnungsbeispiel: Doppelgurtförderer für Werkstückträger

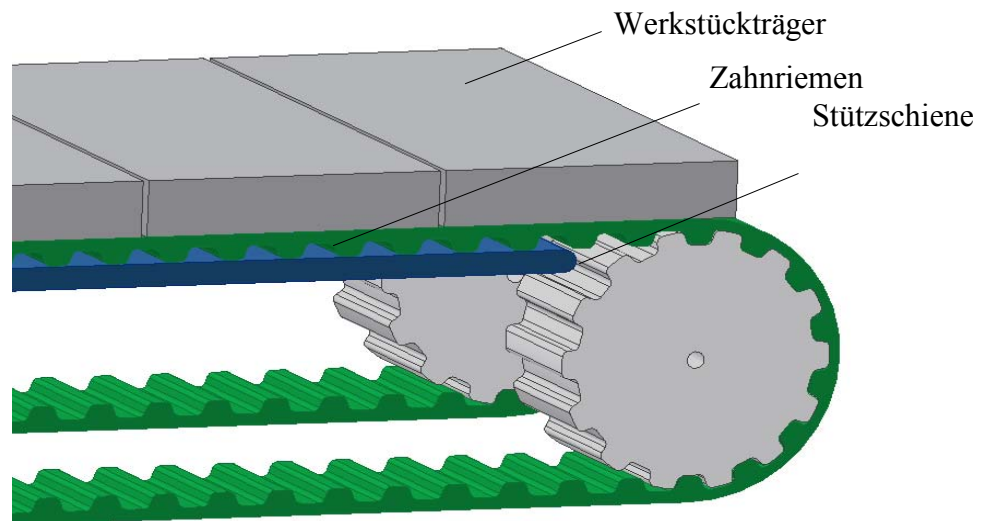


Abbildung 1: schematische Darstellung des Stückgutförderers

Das Berechnungsbeispiel erfolgt nach den Unterlagen der Firma Forbo Siegling GmbH, Hannover [FOR07]. Die Dimensionierung nach den Auslegungsvorschriften anderer Hersteller ergeben vergleichbare Resultate.

Berechnungsbeispiel :

Bandgeschwindigkeit m/s	$v_B := 1.5$	Riemenunterstützung 1 im Lasttrum: PE-UHMW
Masse Werkstückträger kg	$m_W := 5.5$	Riemenunterstützung 2 im Lasttrum: Stahl
Anzahl der Werkstückträger	$A_W := 50$	Riemenunterstützung im Leertrum: Rollen
Achsabstand m	$l_{Band} := 5$	Tabellenwerte:
Riemenanzahl:	$A_R := 2$	Reibwert Stahlabstützung $\mu_{St} := 0.3$
Erdbeschleunigung : m/s <sup>2</sup>	$g := 9.81$	Reibbeiwert PE- Gleitschiene $\mu_{PE} := 0.25$
Zahnscheibendurchmesser: [mm]	$d_0 := 76.4$	Anlauf : ohne Belastung
Zähnezahl Zahnscheibe:	$Z := 24$	Betrieb: reines Fördern

Umfangskraft hier gleich der Reibkraft, da keine nennenswerten Beschleunigungen auftreten

$$\text{Umfangskraft PE [N]} \quad F_{\text{UPE}} := m_{\text{W}} \cdot A_{\text{W}} \cdot \mu_{\text{PE}} \cdot g \quad F_{\text{UPE}} = 674$$

$$\text{Umfangskraft Stahl [N]} \quad F_{\text{USt}} := m_{\text{W}} \cdot A_{\text{W}} \cdot \mu_{\text{St}} \cdot g \quad F_{\text{USt}} = 809$$

$$\begin{array}{ll} \text{Betriebs- und} & c_3 := 0 \\ \text{Beschleunigungsfaktor} & c_2 := 1.2 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{da } i = 1 \\ 20 \% \text{ Reserve} \end{array}$$

$$F_{\text{UmaxPE}} := \frac{c_2 \cdot F_{\text{UPE}}}{A_{\text{R}}} \quad F_{\text{UmaxPE}} = 405$$

$$F_{\text{UmaxSt}} := \frac{c_2 \cdot F_{\text{USt}}}{A_{\text{R}}} \quad F_{\text{UmaxSt}} = 486$$

$$\text{Zahneingriffsfaktor} \quad c_1 := 6 \quad \text{Riemen ist umlaufend und endlosverschweißt}$$

$$\text{Erforderliche spezifische Umfangskraft [N]} \quad F_{\text{UspezPE}} := \frac{F_{\text{UmaxPE}}}{c_1} \quad F_{\text{UspezPE}} = 67$$

$$F_{\text{UspezSt}} := \frac{F_{\text{UmaxSt}}}{c_1} \quad F_{\text{UspezSt}} = 81$$

$$\text{Drehzahl [1/min]} \quad n := \frac{v_{\text{B}} \cdot 19.1 \cdot 10^3}{d_0} \quad n = 375$$

$$\text{Riemenauswahl aus Diagramm:} \quad 2 \text{ Stück } 25 \text{ T } 10$$

$$\begin{array}{lll} \text{ertragbare spezifische Umfangskraft des} & F_{\text{spezU}} := 90 & \text{Teilung: [m]} \\ \text{Riemens [N]:} & & t := 0.010 \\ \text{aus Diagramm} & & \end{array}$$

$$\text{Riemenlänge m} \quad l_{\text{R}} := Z \cdot t + 2 \cdot l_{\text{Band}} \quad l_{\text{R}} = 10.2$$

$$\text{Riemenmasse kg pro Meter} \quad m_{\text{R}''} := 0.12$$

$$\text{Riemenmasse kg} \quad m_{\text{R}} := 2 l_{\text{R}} \cdot m_{\text{R}''} \quad m_{\text{R}} = 2.5$$

maximale Umfangskraft [N]  
unter Einbeziehung der Riemenmasse  
je Riemen

$$F_{\text{Umax}} := \frac{F_{\text{R}} \cdot 1.2}{A_{\text{R}}}$$

$$F_{\text{umaxPE}} := \frac{(2 \cdot m_{\text{R}} + m_{\text{W}} \cdot A_{\text{W}}) \cdot \mu_{\text{PE}} \cdot g \cdot 1.2}{A_{\text{R}}} \quad F_{\text{umaxPE}} = 412$$

$$F_{\text{umaxSt}} := \frac{(2 \cdot m_{\text{R}} + m_{\text{W}} \cdot A_{\text{W}}) \cdot \mu_{\text{St}} \cdot g \cdot 1.2}{A_{\text{R}}} \quad F_{\text{umaxSt}} = 494$$

keine nennenswerte Erhöhung, weitere Nachrechnung unnötig



Zahnfußsicherheit	$s_{\text{ZahnPE}} := \frac{c_1 \cdot F_{\text{spezU}}}{F_{\text{umaxPE}}}$	$s_{\text{ZahnPE}} = 1.3$
	$s_{\text{ZahnSt}} := \frac{c_1 \cdot F_{\text{spezU}}}{F_{\text{umaxSt}}}$	$s_{\text{ZahnSt}} = 1.1$
Zahnfußsicherheit >1 erfüllt		
Vorspannkraft: N	$F_V \geq 0,5 \cdot F_{U_{\text{max}}}$ gewählt	$F_V := 250$
Bemessungskraft PE [N]	$F_{\text{BPE}} := F_V + F_{\text{umaxPE}}$	$F_{\text{BPE}} = 662$
Bemessungskraft Stahl [N]	$F_{\text{BSt}} := F_V + F_{\text{umaxSt}}$	$F_{\text{BSt}} = 744$
zulässige Zugstrangkraft [N]	$F_{\text{zul}} := 1100$	
Zugstrangsicherheit PE	$s_{\text{zugPE}} := \frac{F_{\text{zul}}}{F_{\text{BPE}}}$	$s_{\text{zugPE}} = 1.7$
Zugstrangsicherheit Stahl	$s_{\text{zugSt}} := \frac{F_{\text{zul}}}{F_{\text{BSt}}}$	$s_{\text{zugSt}} = 1.5$
Zugstrangsicherheit >1 erfüllt		

Die Sicherheiten für die Stahl- als auch für die PE-UHMW-Gleitschiene für Zahnfußfestigkeit und Zugstrangfestigkeit liegen über 1. Die Anlage ist für den Dauergebrauch ausreichend dimensioniert. In der Praxis werden jedoch häufig deutlich höhere Sicherheiten gefordert bzw. realisiert.

Temperaturberechnung:

$a_{\text{St}} := 1$	$a_{\text{PE}} := 1$	Materialstärke PE- Gleitschiene	$s_{\text{PE}} := 10$
$b_{\text{St}} := 0.007$	$b_{\text{PE}} := 0.0015$	Materialstärke PE-Unterlage bei Stahlgleitschiene	$s_{\text{St}} := 0$
$c_{\text{St}} := 0.2$	$c_{\text{PE}} := 0.03$	Umgebungstemperatur °C	$T_U := 22$
$d_{\text{St}} := 0.5$	$d_{\text{PE}} := 0.65$		
Länge Werkstückträger m	$l_w := 0.100$		
Breite der Werkstückträgerauflage m	$b_w := 0.025$		
Flächenpressung auf dem Band N/m <sup>2</sup>	$p_w := \frac{m_w \cdot g}{2b_w \cdot l_w}$		$p_w = 10791$
Kontakttemperatur Stahl °C	$T_{\text{St}} := T_U + a_{\text{St}} \cdot [p_w \cdot \mu_{\text{St}} \cdot v_B \cdot (b_{\text{St}} \cdot s_{\text{St}} + c_{\text{St}})]^{d_{\text{St}}}$		$T_{\text{St}} = 53.2$
Kontakttemperatur PE °C	$T_{\text{PE}} := T_U + a_{\text{PE}} \cdot [p_w \cdot \mu_{\text{PE}} \cdot v_B \cdot (b_{\text{PE}} \cdot s_{\text{PE}} + c_{\text{PE}})]^{d_{\text{PE}}}$		$T_{\text{PE}} = 51.5$

Die Ermittlung der Kontakttemperatur mit der vorgeschlagenen Exponentialfunktion ergibt Werte deutlich unterhalb der Grenztemperatur von 60 ° C.

Mögliche Szenarien:

Erhöhung der Raumtemperatur:	Kontakttemperaturerhöhung bei PE- und Stahlgleitschiene
Steigerung der Bandgeschwindigkeit:	Kontakttemperaturerhöhung bei PE- und Stahlgleitschiene
Verlängerung der Bandstrecke:	Zugstrang- und Zahnfußsicherheiten sinken
Verbreiterung des Zahnriemens:	Zugstrang- und Zahnfußsicherheiten steigen
Erhöhung der Masse:	Zugstrang- und Zahnfußsicherheiten sinken; Kontakttemperaturen steigt

Bei Verwendung der sich einstellenden Reibwerte bei Dauerbeanspruchung ist mit den folgenden Ergebnissen zu rechnen.

Variation des Eingangsparameters  $\mu$ :

Reibwert für Stahl :	$\mu = 0,75$	Zugstrangsicherheit	0,4
		Zahnfußsicherheit	0,7
		Kontakttemperatur	71 °C
Reibwert für PE:	$\mu = 0,5$	Zugstrangsicherheit	0,7
		Zahnfußsicherheit	1,0
		Kontakttemperatur	68°C

Die Sicherheiten für die Zugstrangbelastung und der Zahnfußfestigkeit für PA-beschichtete Zahnriemen an der Stahlgleitschiene liegen jeweils unterhalb von 1.

Die Zugstrangsicherheit bei PE-UHMW-Gleitschiene in Gleitkontakt mit PA-beschichteten Zahnriemen liegen unterhalb von 1.

Ein sicherer Betrieb der Anlage ist nicht gegeben.

Die Kontakttemperatur der an der Stahlgleitschiene erreicht 71°C. Unter diesen thermischen Bedingungen ist mit einem erhöhten Verschleiß am Zahnriemen zu rechnen.

Die Kontakttemperatur an der PE-UHMW-Gleitschiene beträgt mit den angenommenen Werten 68 °C und befindet sich oberhalb der Grenztemperatur. Diese Beanspruchung der Fördereinrichtung bringt die Gefahr der Stützschienerstörung durch Aufschmelzen.